

Josephine Blei & Christian Koepfer
Römische Technik im Experiment II

Römische Technik im Experiment II

Archäologische Experimente zum römischen
Wasserleitungsbau

Herausgegeben von
Josephine Blei & Christian Koepfer

2017

Impressum:

© Josephine Blei. Alle Rechte vorbehalten.

Redaktion & Layout: Josephine Blei.

Gefördert durch die Dr. Rudolf Zorn-Stiftung Kempten und die Sparkassenstiftung Allgäu.

INHALT

Einleitung.....	7
<i>Christian Koepfer</i>	
Römischer Beton: Hölzerne Schale, harter Kern. Die Herstellung römischer Fertigbetonteile zum Bau einer Wasserleitung im archäologischen Experiment	13
<i>Agnes Mayer</i>	
Herstellung eines Wasserleitungsrohres aus Blei.....	35
<i>Tobias Häring</i>	
Die Entdeckung der Langsamkeit. Oder: Der Nachbau einer römischen Deichelleitung	51
<i>Josephine Blei</i>	
Nachbau einer römischen Doppelkolbendruckpumpe	79
<i>Alina Bell, Alexander Göller, Beatrice Spengler</i>	

Einleitung

Christian Koepfer

Experimentelle Archäologie mit Studierenden birgt Chancen und Risiken. Um Studierende an das Thema und seine Theorie und Methoden heranzuführen, ist die Durchführung eigener Experimente durch die Studierenden wegen der Möglichkeit zu handlungsorientiertem Lernen eine sinnvolle Alternative zu reiner Wissensvermittlung in einem Seminar.

Im Fall des hier publizierten experimental-archäologischen Projektes konnten Studierende ein Semester lang ihre Fragestellungen ausarbeiten, Quellen und Literatur sichten, um im zweiten Teil dann konkret die Experimente zu planen, Materiallisten zu erstellen, und die Experimente durchzuführen. In einer dritten Veranstaltung, die an die Versuche anschloss, wurden dann die Ergebnisse ausgewertet und die Publikation vorbereitet.

Das aktuelle Studiensystem bereitet hier aber in mancherlei Hinsicht eine Reihe von Problemen: Die im Vergleich zu früher sehr hohe Semesterstundenzahl lässt generell viele Studierende vor Abschluss einer Lehrveranstaltung wieder abspringen, insbesondere aus Veranstaltungen, die, wie Wissenschaftliche Übungen, oft weniger Leistungspunkte bringen. Gleichzeitig müssen die Studierenden in den Semesterferien sehr viel häufiger als früher Praktika durchführen, deren Termine oft nur sehr kurzfristig festgelegt werden können. So ist die Teilnahme an solchen Veranstaltungen gegen Ende oft mäßig, trotz langfristiger Terminfestlegung und Planung. Da sich die Studierenden erst kurz vor Ende des Semesters für die eigentliche Teilnahme durch eine Prüfungsanmeldung festlegen müssen, hat man als Dozent auch keinerlei Sanktionsmöglichkeiten, wenn die Studierenden es sich, aus welchen Gründen auch immer, kurzfristig anders überlegen. Dies ist besonders für diejenigen Studierenden misslich, die sich auf die Teilnahme ihrer Partner in einem Projekt verlassen und dann unter Umständen alleine ein Projekt durchführen müssen, das eigentlich von drei oder vier Studierenden gemeinsam bearbeitet werden sollte. Gleichwohl ist für die, die ein Projekt abschließen können, der Lerneffekt durchaus hoch, und auch oft mit persönlichen Erfolgen, Freude an der eigenen Arbeit und einem Gruppenerlebnis verbunden, alles Dinge, die im „modernen“ Lehrbetrieb an der Universität in der Regel zu kurz kommen.

Dies alles traf auch auf das in diesem Band vorgestellte Projekt zu:

Ein Teil der Experimente konnte aus den genannten Gründen leider nicht publiziert werden: So scheiterte auch die vollständige Durchführung einiger Experimente an der zeitweiligen Abwesenheit einiger Studierender bzw. deren völligem Ausbleiben, auch wenn die anwesenden Studierenden mit großem Eifer versuchten, diesen Mischstand aufzufangen (- so sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass zum Beispiel die Studierende Lisa Stanislawski trotz einer schweren Verletzung sogar auf Krücken bei der praktischen Durchführung der Experimente mithalf).

Daher bietet der vorliegende Band kein vollständiges Bild des durchgeführten Projektes, so fehlt ein Artikel über die hergestellten Tonleitungen. Umso mehr muss denjenigen Studierenden, die das Projekt bis zum Ende begleitet und ihr Experiment schriftlich für diesen Band dokumentiert haben, Lob und Achtung zukommen.

Die vorliegende Publikation ist das Ergebnis eines Projektes „Wasser für Cambodunum“, das an der Universität Augsburg vom Wintersemester 2014/15 bis zum Wintersemester 2015/16 durchgeführt wurde. Die Experimente fanden im Archäologischen Park Cambodunum (APC) im Juli und August 2015 statt. Die Geldmittel wurden der Universität Augsburg dankenswerterweise von der Dr. Rudolf Zorn-Stiftung Kempten (5000.-€) und der Sparkassenstiftung Allgäu (1000.-€) zur Verfügung gestellt.

Bei durchgehend gutem Wetter wurden die Experimente am 11./12., 25./26. Juli sowie am 1./2. und 8./9. August im APC ausgeführt. Beteiligte Personen waren die Herausgeber und Autoren der hier versammelten Beiträge, die maßgeblich die Durchführung der Experimente betreuten; außerdem waren an der Vorbereitung und Durchführung die Studierenden Julia Ahlert, Ferdinand Böck, Mia-Alena Maas, Johannes Mair, Lavinia Meyl und Lisa Stanislawski beteiligt.

Die geographische Situation des antiken Cambodunum hat die Archäologie immer wieder zu Überlegungen veranlasst, wie Siedlungen dieser Größe in der Antike mit Wasser versorgt worden sind.¹ Neben einer gefundenen hölzernen Deichelleitung, die aus einem höher gelegenen Gebiet in relativer Nähe an die Stadt heranführte, sowie einigen ausgegrabenen Brunnen, gibt es bislang keine Hinweise auf eine Wasserleitung, die Cambodunum - mit seinen prominenten Badeanlagen - in ausreichender Menge mit Wasser

¹ WEBER 2000, 71; GREWE 1988; SCHNEIDER 1997, 283-290; CECHE 2011, 114-141.

versorgen konnte.² Die Thematisierung dieses Problems in der Konversation mit den Besuchern des APC war ein wesentlicher Bestandteil des Projektes. Gleichzeitig diente das Thema Wasserversorgung als Aufhänger für die Fragestellungen der archäologischen Experimente.

Experimentelle Archäologie erfordert eigentlich „Experten“³ in den jeweiligen handwerklichen Bereichen. Dies sind die Studierenden in der Regel nicht. Hier gilt es, die Fragestellungen möglichst so zu formulieren, daß dennoch ein Ergebnis erzielt werden kann und die Arbeitsschritte/-prozesse bewältigt werden können; daher sind die Fragestellungen möglichst einfach gehalten. Da aber nicht notwendigerweise immer ganz klar ist, wie anspruchsvoll ein Experiment werden kann⁴ - insbesondere bei dynamischen Experimenten, also Experimenten, bei denen sich die Fragestellung mit Fortführung des Experiments ändern kann,⁵ - können in studentischen Projekten schnell Grenzen erreicht werden, oder zumindest Situationen entstehen, die für alle Beteiligten eine große Herausforderung darstellen. Aus wissenschaftlicher Sicht sollte dies aber kein Problem sein - schließlich sind ja alle Formen von Ergebnissen, „positive“ wie „negative“, eine Wissensbereicherung.⁶ Insofern ist auch ein Experiment, das nicht das gedachte oder gewünschte Ergebnis bringt, aus wissenschaftlicher Sicht ein Erfolg, da man feststellen kann: „So geht es schon einmal nicht.“ Gerade bei Experimenten, die eine dynamische Fortführung erfordern, ist ein im Zeit- und Geldrahmen eng festgelegtes Projekt unter Umständen hinderlich - auch wenn man gerne weitermachen und die gewonnenen Erkenntnisse in eine fortführende Arbeit einfließen lassen würde. Hier ist die Publikation also besonders wichtig, nicht nur, um die Studierenden konkret an das wissenschaftliche Publizieren heranzuführen, sondern auch, um die Ergebnisse der Arbeit zu sichern, so daß man das Projekt später gegebenenfalls selbst weiterführen kann, oder anderen Personen die Möglichkeit gibt, darauf aufzubauen.

² WEBER 2000, 71: Bisher sind nur zwei Abschnitte einer (?) Deichelleitung bekannt, die aber nicht den ganzen Ort ausreichend versorgt haben kann. Weitere Deichelleitungen wurden postuliert, sind aber bisher nicht belegt.

³ Vgl. zum Beispiel KELTERBORN 1994.

⁴ Ein solches Experiment ist ein epistemisches Ding, vgl. dazu RHEINBERGER 2001, 25: „Epistemische Dinge verkörpern, paradox gesagt, das, was man noch nicht weiß. Sie haben den prekären Status, in ihrer experimentellen Präsenz abwesend zu sein.“

⁵ RICHTER 2005, 113-115.

⁶ RICHTER 2005, 117-125.

Bei diesem Projekt war auch eine publikumswirksame Durchführung der Experimente seitens des APC gewünscht. Vorherige Ankündigungen in der Lokalpresse sorgten für zahlreiche interessierte Besucher. Damit diese den Arbeitsbetrieb nicht aufhielten, wurden sie teilweise in die Experimente eingebunden, zum Beispiel beim Bohren der Holzwasserleitung, oder Studierende, die gerade Pause oder „etwas Luft“ hatten, erklärten den Besuchern das Projekt. Gleichzeitig hatten die Studierenden Tafeln vorbereitet, die vor der Experimentierfläche aufgestellt wurden und auf denen sich die Besucher selbst informieren konnten. So entstand ein guter Synergieeffekt: Auch die Studierenden profitierten, indem sie ihr eigenes Projekt für den Laien verständlich und spannend erklären konnten, was zu einem verstärkten Eigenverständnis der Abläufe und Arbeitsprozesse führte; die Besucher hingegen hatten ein eindruckliches interaktives Erlebnis.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Gregor Weber von der Universität Augsburg für die Bereitschaft, die Experimentelle Archäologie in das Lehrprogramm der Alten Geschichte aufzunehmen und zu fördern. Für die Unterstützung bei der Einwerbung der Fördermittel sowie für die Möglichkeit, den APC (und seine Ressourcen) als Experimentierfläche zu nutzen, seien Herr Dr. Gerhard Weber und Herr Martin Fink vom Kulturstadamt der Stadt Kempten bedankt, sowie besonders die Mitarbeiter des APC, Ernst Sontheim, Manfred Haas und Ewald Menschig für ihre tatkräftige Unterstützung vor Ort. Ein weiterer Dank gilt Herrn Felix Blersch von der Allgäuer Zeitung, und Herrn Mayrock sen. für zahlreiche wertvolle Tips. Der Mittelschule auf dem Lindenberg in Kempten ist für die Bereitstellung der Duschen und Waschräume zu danken.

Abschließender Dank geht an Frau Dr. Josephine Blei von der Universität Passau, sowohl für die kurzfristige Übernahme eines Experimentes vor Ort, als auch besonders für die sorgfältige und verlässliche Betreuung und Redaktion der Publikation.

Nicht zu vergessen sind natürlich alle mitwirkenden Studierenden - ihnen sei ausdrücklich für ihr Engagement, Interesse, ihre gute Laune und ihre Leidenschaft gedankt.

Mering, im Februar 2017

Literatur

- Cech 2011: B. CECH, Technik in der Antike (2. Aufl. Darmstadt 2011).
- Grewe 1988: K. GREWE, Römische Wasserleitungen nördlich der Alpen, in: Frontinus-Gesellschaft (Hg.), Die Wasserversorgung antiker Städte. Geschichte der Wasserversorgung 3 (Mainz 1988) 45-97.
- Kelterborn 1994: P. KELTERBORN, Was ist ein wissenschaftliches Experiment?, in: AEAS / GAES Anzeiger 1 (1994) 7-9.
- Rheinberger 2001: H.-J. RHEINBERGER, Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas (Göttingen 2001).
- Richter 2005: P. RICHTER, Experimentelle Archäologie: Ziele, Methoden, Aussagemöglichkeiten, in: ExAr (Hg.), Von der Altsteinzeit über ‚Ötzi‘ bis zum Mittelalter. Ausgewählte Beiträge zur Experimentellen Archäologie in Europa 1990-2003. Experimentelle Archäologie in Europa Sonderband 1 (Oldenburg 2005) 95-128.
- Schneider 1997: H. SCHNEIDER, Die Gaben des Prometheus. Technik im Antiken Mittelmeerraum zwischen 750 v. Chr. und 55 n. Chr., in: D. Hägermann/H. Schneider, Landbau und Handwerk 750 v. Chr. bis 1000 n. Chr. Propyläen Technikgeschichte 1 (Neuausgabe Berlin 1997) 17-313.
- Weber 2000: G. WEBER, Thermae et balnea in: Ders. (Hg.), Cambodunum - Kempten. Erste Hauptstadt der Provinz Raetien? (Mainz 2000) 67-72.

Römischer Beton: Hölzerne Schale, harter Kern. Die Herstellung römischer Fertigbetonteile zum Bau einer Wasserleitung im archäologischen Experiment

Agnes Mayer

Erfunden in der Römerzeit, vergessen im Mittelalter, neuentdeckt und unverzichtbar in der Bauindustrie der Gegenwart: Beton. Als beständiger, leicht zu verarbeitender und vergleichsweise günstig zu produzierender Baustoff kommt er damals wie heute vielseitig zum Einsatz - unter anderem bei Wasserleitungssystemen.¹ Wie Funde aus dem französischen Metz demonstrieren, verwendeten bereits die Römer Beton, um Röhren zum Transport von Wasser herzustellen. Diese bestanden aus einzelnen, etwa einen Meter langen Fertigbetonteilen, die über ein Stecksystem verbunden wurden und so beliebig verlängert werden konnten. Aufgrund der hohen Festigkeit des Baustoffs konnten diese Wasserleitungen aus Beton einem höheren Wasserdruck standhalten als Ton- oder Bleirohre und waren somit wesentlich stabiler.² Was den römischen Beton so widerstandsfähig machte, dass er der Zeit und den Wettereinflüssen trotzte, war lange Zeit ein Rätsel. Seine genaue Zusammensetzung und chemisch-physikalische Wirkweise wurden erst in den vergangenen Jahren wissenschaftlich genau untersucht.³ Die Ergebnisse könnten zukunftsweisend sein für die gegenwärtige Bautechnik.

Im Rahmen des Experimentes im Archäologischen Park Cambodunum in Kempten wurde erstmalig versucht, sich der Rekonstruktion solcher Betonröhren in einem dynamischen Versuchsaufbau wissenschaftlich anzunähern. Dabei wurde zum einen eine Betonmasse basierend auf den neuesten Forschungsergebnissen aus Vulkanasche, Kalk, Wasser und Zuschlägen zusammengemischt, zum anderen schließlich dieses Konglomerat mithilfe von Holzverschalungen zu einzelnen Fertigteilen gegossen. In zwei aufeinanderfolgenden Versuchsabläufen wurden jeweils zwei beziehungsweise drei Exemplare dieser Steckröhren hergestellt. Ziel des archäologischen Experiments war es, auf diese Weise die Herstellung der Wasserleitungselemente auf Grundlage der römischen Funde nachzuvollziehen.

¹ Vgl. LOHAUS u.a. 2014, 36.

² Vgl. LAMPRECHT 2001, 213.

³ Siehe dazu genau unten S. 14.

Revolution der Baukunst: opus caementitium - römischer Beton

Heutzutage ist Beton ein Massenprodukt in der Bauindustrie - ob als Fertigteil geliefert, als Fundament frisch gegossen oder in Kombination mit Stahl als Deckenkonstruktionen. Weit mehr als 50 Prozent aller Bauwerke seien heutzutage in unseren Breiten aus Beton, schätzt der Bauingenieur Heinz-Otto Lamprecht.⁴ Wichtigster Bestandteil ist der Zement: In Kombination mit Wasser verursacht er eine chemisch-physikalische Reaktion, die sogenannte Hydratation, bei der die feuchte Masse erhärtet.⁵ Um Zement herzustellen, muss Kalkstein bei 1400 bis 1500° C gebrannt werden - ein Temperaturwert, der im Zeitalter der Römer, soweit wir wissen, noch gar nicht zu erreichen war. Trotzdem beweisen bis heute erhaltene Monumentalbauten wie das Pantheon, das Kolosseum oder die Trajansmärkte in Rom, dass bereits damals auf den Baustoff Beton zurückgegriffen wurde. Doch was steckt genau hinter dem Beton der Römer?

Erst im Dezember 2014 gelang es einem international und interdisziplinär arbeitenden Forschungsteam der Berkeley University im US-Staat Kalifornien, die einzelnen Bestandteile des römischen Betons und ihr Zusammenspielen mittels spezieller Röntgentechnik zu analysieren.⁶ Dabei wurden Bruchstücke aus den Wänden der Trajansmärkte in Rom untersucht. Leiterin der Studien war Marie Jackson, Wissenschaftlerin für Bauingenieurswesen und Umwelttechnik.

Zwar verwendeten die Römer schon damals gebrannten Kalk, allerdings wurde dieser bei rund 900° C in den antiken Brennöfen hergestellt, wie Funde von solchen Kalkbrennöfen beweisen.⁷ Ausschlaggebend für die Festigkeit und bis heute andauernde Stabilität römischer Betonbauten war vielmehr ein anderes Material: Vulkanasche. Bevorzugt wurde damals auf Vulkanerden aus Kampanien zurückgegriffen, also der Gegend rund um den Vesuv. Aufgrund des Abbaugebiets Pozzuoli (das antike *Puteoli*) sind diese Erden auch als Puzzolane bekannt.⁸ Vermischt mit gemahlenem Kalkstein und Wasser entwickeln sich die besonderen Bindeeigenschaften der Vulkanasche und ergeben eine Mörtelmasse, die in ihrer Konsistenz und Wirkweise mit dem heutigen Zement ver-

⁴ Siehe LAMPRECHT 2001, 30.

⁵ LAMPRECHT 2001, 31.

⁶ Diese Untersuchungen basierten auf zuvor durchgeführten Belastbarkeitstest an Bruchstücken römischen Betons, die an der Cornell University im US-Staat New York durchgeführt wurden; vgl. YARRIS 2014.

⁷ Vgl. LAMPRECHT 2000, 1274; SINN 1993, 136.

⁸ STUTZINGER 2012, 369.

gleichbar ist. Als weiteren Bestandteil gaben die Römer verschiedene Zuschläge in die Masse (Abb. 1). Dabei konnte es sich um grobkörnigen Sand beziehungsweise Brocken von Vulkangestein oder Ziegelbruch handeln.⁹ Die Zuschläge unterscheiden sich je nach Fundstätte stark, da aus Kostengründen verwendet wurde, was vor Ort vorhanden war.¹⁰



Abb. 1: Der Querschnitt eines untersuchten Betonbrockens von den Trajansmärkten in Rom zeigt, dass der Mörtelmasse Zuschlag aus Tuff- und Ziegelsteinen zugegeben wurde.

⁹ Bei der freitragenden Kuppel des Pantheon wurden Bimsstein und Tonhohlkörper als Zuschlag verwendet, um das Gewicht der Betonmasse zu verringern; vgl. WEEBER 2010, 151.

¹⁰ LAMPRECHT 1989, 83.

Die Vorteile des römischen Betons, des sogenannten *opus caementitium*¹¹, waren mannigfaltig: Die Römer hatten zum einen die Möglichkeit, mit ihm unter Wasser zu betonieren, wie einzelne Hafenanlagen aus dieser Zeit demonstrieren. Zum anderen weist er eine deutlich höhere Festigkeit auf, da seine Kristallstruktur Aluminiumatome enthält, die die Binefähigkeit des Materials erhöhen und verhindern, dass Mikrorisse sich weiter ausdehnen. Das macht das Material wesentlich beständiger gegenüber Erschütterungen als der heute vorwiegend eingesetzte Beton aus Portlandzement.¹²

Die ersten Bauwerke aus römischen Beton stammen neuesten Forschungen zufolge aus dem zweiten Jahrhundert v. Chr. Bislang war man von einer wesentlich älteren Datierung ausgegangen und schätzte die meisten Betonbauten auf das vierte bis dritte Jahrhundert v. Chr. Sie sind somit keine Errungenschaft der Mittleren Republik, verbreiteten sich dafür jedoch wesentlich schneller als bisher angenommen - bis hinein in die römischen Provinzen.¹³ Karl-Wilhelm Weeber spricht von einem „ungeheuren Bauboom“¹⁴.

Innerhalb weniger Jahrzehnte sollte Beton die damals vorherrschenden Baumaterialien ablösen und die Bautechnik der Römer grundlegend ändern: Lamprecht nennt dies einen „Wendepunkt in der Architektur“¹⁵, Deichmann eine „Revolution des Bauprozesses“¹⁶. Zuvor dominierte vor allem Holz die Architektur, Stein und Marmor kamen vorwiegend bei repräsentativen Bauten wie Tempeln zum Einsatz.¹⁷ Zunächst ersetzte der römische Beton vor allem Gebäudetypen, die schnell und günstig hochgezogen werden mussten. So fand das neue Baumaterial Verwendung beim Bau von Stadtmauern, Hafenanlagen und Aquädukten. Erst nach und nach erkannten die römischen Baumeister, welche Möglichkeiten der Beton noch birgt: Schließlich lässt sich die feuchte Masse in Verschalungen gießen und ist somit beliebig formbar. Dies habe die Architekten zu kühnen Kon-

¹¹ Der Begriff setzt sich zusammen aus den lateinischen Worten *opus*, das so viel wie Werk, Bauwerk oder Bauverfahren bedeutet, und dem vom *caementum* abgewandelten Wortteil *caementitium*, das sich als behauener Stein oder Mauerstein übersetzen lässt. Meist spricht man aber schlichtweg von römischem Beton; vgl. LAMPRECHT 1985, 21.

¹² Vgl. YARRIS 2014.

¹³ Diese These stellt Marcello Mogetta in seiner 2013 veröffentlichten Dissertation auf. Er kritisiert, dass bislang bei der Datierung veraltete Methoden und theoretische Schätzungen anhand von Schriftquellen verwendet wurden. Mogetta geht anhand von Techniken der Verputzung und der Wandmalerei von einer späteren Datierung aus; vgl. MOGETTA 2013, 16f. und MOGETTA 2015, 33.

¹⁴ WEEBER 2010, 150.

¹⁵ LAMPRECHT 2001, 33.

¹⁶ DEICHMANN 1979, 473.

¹⁷ Vgl. STUTZINGER 2012, 369.

struktionen ermutigt, meint Weeber. Innovationen wie Gewölbe-, Kuppel- oder Bogenbauten wären ohne Beton kaum möglich gewesen.¹⁸

Doch als sichtbares Bauelement kam der Beton damals nicht zum Einsatz, vielmehr wirkte er als Kern mit tragender Funktion im Verborgenen. Denn man verkleidete die Betonbauten mit Ziegeln oder Marmor, so dass sie prächtig und repräsentativ wirkten. Von diesen Fassaden ist allerdings heutzutage kaum mehr etwas erhalten, denn oftmals wurden sie als Materiallager ausgeschlachtet - zurück blieben oft nur die widerspenstigen Betonkerne.¹⁹

Quellenlage

Opus caementitium wird zwar immer wieder in historischen Quellen als Baumaterial beschrieben, doch die Schilderungen sind unzureichend, so dass seine genaue Zusammensetzung und Wirkweise erst durch spezifische Untersuchungen von Fundstücken erforscht werden konnte. Die wohl umfangreichste Beschreibung findet sich in den „Zehn Büchern über Architektur“ des in augusteischer Zeit wirkenden Architekten und Ingenieurs Vitruvius. In seinem Werk über die Bautechnik der Römer geht er an mehreren Stellen auf die Herstellung der Betonmasse und ihre Verwendung an unterschiedlichen Einsatzorten ein. Im Kapitel „Über Puteolanerde“ beschreibt er den Baustoff, der eine ungeheure Festigkeit beweist und sogar dem Wasser und den Wogen des Meeres trotzt, wie folgt:

„Es gibt aber auch eine Erdart, die von Natur wunderbare Ergebnisse hervorbringt. Sie steht an im Gebiet von Bajae und der Städte, die rund um den Vesuv liegen. Mit Kalk und Bruchstein gemischt gibt sie nicht nur den übrigen Bauwerken Festigkeit, sondern auch Dämme werden, wenn sie damit im Meere gebaut werden, im Wasser fest. (...) Wenn also drei Dinge (...) in eine Mischung gelangen, dann fügen sie sich, wenn plötzlich Feuchtigkeit aufgenommen ist, fest zusammen, und sie werden schnell, durch die Feuchtigkeit gehärtet, fest, und weder die Wogen noch die Macht des Wassers können sie von einander lösen.“²⁰

¹⁸ Vgl. WEEBER 2010, 150.

¹⁹ Vgl. STUTZINGER 2012, 369; LAMPRECHT 1985, 26; WEEBER 2010, 150.

²⁰ Vitr. 2,6,1.

Vitruvius unterscheidet zwischen zwei Typen der Vulkanasche, die er als Puteolanerde bezeichnet: Zum einen spricht er von „in Etrurien ausgeglühte[m] *carbunculus*“, zum anderen von einer Erde, bei der „in Kampanien ausgebrannte Erde aschenartiger Sand wird“.²¹ Beide seien hervorragend geeignet für Bauarbeiten bei Mauerwerken, erstere aber habe gute Eigenschaften bei Gebäuden auf dem Lande, die andere auch bei im Meer gebauten Dämmen. In einem weiteren Kapitel gibt Vitruvius Empfehlungen „über die Anlage von Häfen und Wasserbauten“, hier etwa zur Verwendung des Betons:

*„Solches Mauerwerk aber, das im Meer stehen soll, muß man, wie es scheint, folgendermaßen herstellen: Es wird Erde aus der Gegend herbeigeschafft, die von Cumae bis zum Vorgebirge von Minerva reicht, und die wird so gemischt, daß in der Mörtelwanne zwei Teile [Erde] einem Teil Kalk entsprechen. Dann muß man an der dafür bestimmten Stelle Senkkästen ohne Boden, die aus Eichenrammpfählen hergestellt werden und durch hölzerne Zangen eingeschlossen sind, durch Hinablassen ins Wasser und festes Rammen herstellen.“*²²

Daneben gibt es noch zwei Erwähnungen des Baumaterials in der Naturgeschichte Plinius' des Älteren: Bei der Beschreibung des Hafens von Ostia spricht er von „drei turmhoch (...) gebauten Dämmen aus eigens dafür herbeigebrachter Puteolanischer Erde“²³ bzw. von „Türmen aus Puteolanischer Erde“.²⁴

Möglicherweise zeigt auch eine bildliche Darstellung, ein Relief auf der Trajanssäule (Abb. 2), Bauarbeiten mit Beton. Die Säule ist wie auch die Trajansmärkte Teil des Trajansforums, das um 112/113 n. Chr. zu Ehren des römischen Herrschers gebaut wurde, und stellt die Kriege Trajans gegen die Daker dar. Eine der zahlreichen dort abgebildeten Szenen (Szene 11/12 nach Cichorius²⁵) zeigt laut Heinz-Otto Lamprecht die Bauarbeiten an einer Stadtmauer, bei denen *opus caementitium* zum Einsatz kam. Verschiedene Arbeiter werden beim Transport der Mörtelmasse in Körben dargestellt, wie Lam-

²¹ Vit. 2,6,6.

²² Vit. 5,12,2f.

²³ Plin. nat. hist. 16,76.

²⁴ Plin. nat. hist. 36,14.

²⁵ Siehe CICHORIUS 1896.

precht die Darstellung interpretiert.²⁶ Bei Werner Gauer, der das über 200 Meter lange Reliefband der Säule untersucht hat, findet sich eine solche Beschreibung jedoch nicht, er sieht in diesem Abschnitt des Reliefs lediglich den Bau einer Festungsanlage.²⁷ Conrad Cichorius spricht in seinem Werk über die Trajanssäule aus dem Jahr 1896 von „eine[m] wohl mit Erde gefüllten, geflochtenen Korb“, der emporgereicht wird.²⁸



Abb. 2: Darstellung von Bauarbeiten auf der Trajanssäule

²⁶ Vgl. LAMPRECHT 1989, 83.

²⁷ Vgl. GAUER 1977, 16.

²⁸ CICHORIUS 1896, 64.

Forschungsstand und Funde

Dominiert wird das Forschungsfeld vor allem im deutschsprachigen Raum von dem Bauingenieur Heinz-Otto Lamprecht, der einen technikgeschichtlichen Ansatz verfolgt.²⁹ Die meisten Forschungen zum römischen Beton beziehen sich auf sein grundlegendes Werk „Opus Caementitium“ aus dem Jahr 1985, wenngleich dieses, zwar schon mehrmals neu aufgelegt, in manchen Punkten inzwischen überholt ist. Denn ausgehend von den bahnbrechenden Forschungen Lamprechts haben sich seinen Darstellungen seit den 1980er Jahren kaum neue Ergebnisse zugesellt.³⁰ An einem aktuellen Überblickswerk fehlt es. Stattdessen wurden in jüngster Zeit zu einzelnen Forschungsfragen zum römischen Beton Studien veröffentlicht, so zum Beispiel zur Zusammensetzung des *opus caementitium*, welche die Wissenschaftler der Berkeley University erforschten.³¹ Allerdings beziehen sich diese Ergebnisse vielmehr auf die chemische und physikalische Wirkweise des Baustoffes, weniger auf seine tatsächliche Herstellung und Verwendung. Hinzu kommt die Dissertationsarbeit Marcello Mogettas – der Historiker stellt die These auf, dass bei der Datierung vieler römischer Betonbauten von einer wesentlich jüngeren Grundsteinlegung ausgegangen werden kann.³²

Bezieht man sich auf Forschungen zu den Fertigbetonteilen für Wasserleitungen, die die Grundlage dieses Experiments bilden, werden die wissenschaftlichen Informationen spärlich, zu vielen Fragestellungen sogar unzureichend. Zwar erwähnen mehrere Historiker und Archäologen diesen Typ von Wasserleitung in einer Aufzählung neben den wesentlich besser erforschten Rohren aus Metall, Ton oder Holz.³³ Doch konkrete Beschreibungen zu den Funden und der Verwendung dieser Betonrohre fehlen. Eine Ausnahme ist Heinz-Otto Lamprecht, wenn auch bei ihm manche Fragen offen bleiben, zum Beispiel zur genauen Fundsituation und zur Beschaffenheit der Funde.

²⁹ So geht er zum Beispiel vor allem auf die röntgengraphischen und mikroskopischen Untersuchungen zu Druckfestigkeit und Rohdichte ein, die in Zusammenarbeit mit verschiedenen Museen, Forschungseinrichtungen und Universitäten gemacht wurden, liefert aber bei vielen Bild- und Schriftquellen nur unzureichende Informationen, siehe LAMPRECHT 2001, 54-87.

³⁰ Vgl. zum Beispiel LAMPRECHT 1986; LAMPRECHT 1989; LAMPRECHT 2000.

³¹ Siehe oben S. 14.

³² Siehe oben S. 16.

³³ So führt zum Beispiel Klaus Grewe in einer Aufzählung die „Fertigrohre aus Gußbeton“ auf: GREWE 1985, 59. Auch bei Brigitte Cech ist Beton in einer Auflistung von Wasserrohrtypen zu finden, vgl. Cech 2011, 128.

Er unterscheidet zwischen U-förmigen Rinnen bei Aquädukten wie zum Beispiel bei der Eiffelleitung, großen Abwasserkanälen wie der *cloaca maxima* in Rom und den kleineren Betonröhren aus mehreren Steckteilen. Zu ersteren beiden gibt es eigene wissenschaftliche Abhandlungen zum Beispiel von Klaus Grewe, der den Bau von Aquädukten und römischen Wasserleitungssystemen umfangreich erforschte.³⁴ Letzterer Wasserleitungstyp, der auch die Grundlage des Experiments bildete, wird nur bei Lamprecht genauer beschrieben. Er bezieht sich dabei auf Teile einer Wasserleitung aus Beton, die im Archäologischen Museum im französischen Metz, dem Musée de la Cour d'Or, ausgestellt sind. In seinem Werk „Opus Caementitium. Bautechnik der Römer“ sind auch drei Fotografien dieser Fertigbetonteile aus dem Museum abgebildet, die insgesamt fünf verschiedene Fundstücke zeigen (Abb. 3a-c).³⁵

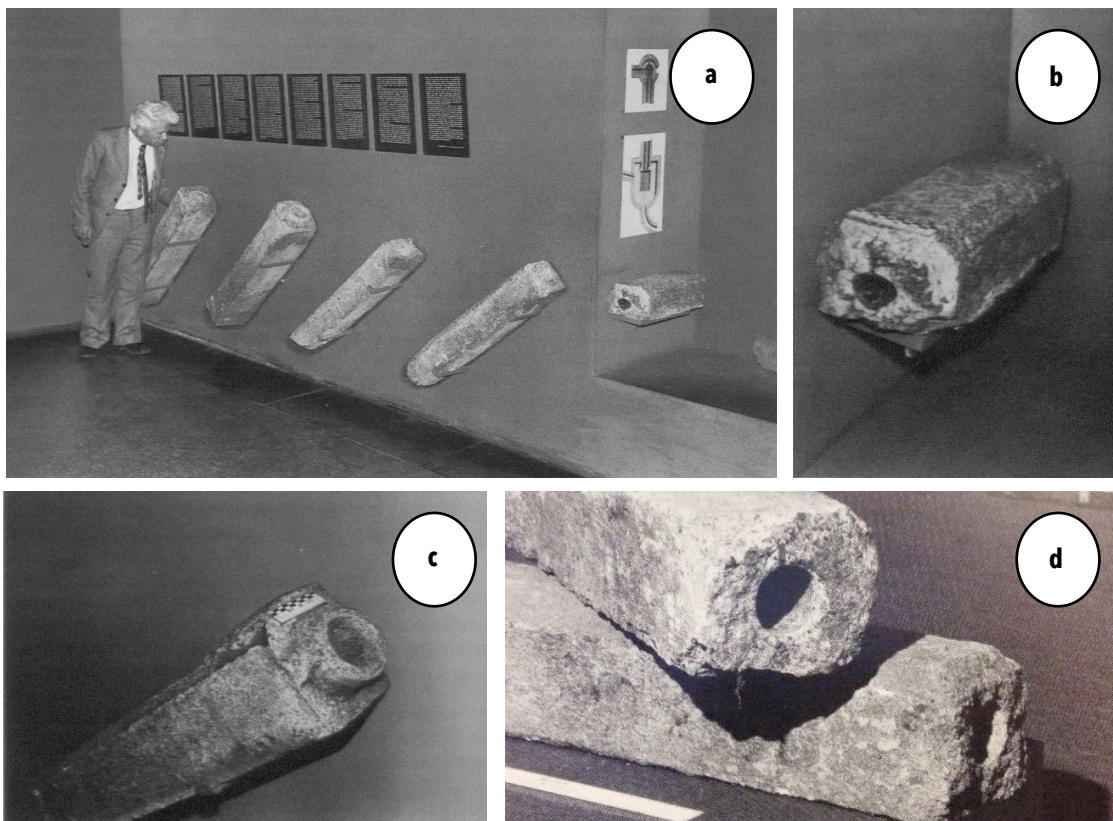


Abb. 3a-d: Funde römischer Betonwasserleitungsstücke im Archäologischen Museum Metz

³⁴ Vgl. etwa zuletzt GREWE 2014.

³⁵ Siehe LAMPRECHT 1985, 180. Eine der Fotografien findet sich auch in seinem Aufsatz in den Mitteilungsblättern der Bundesanstalt für Wasserbau wieder, allerdings geht er auf die abgebildeten Betonröhren im Text nicht ein, vgl. LAMPRECHT 1989, 86.

Wo und wann diese Funde aber genau gemacht wurden, geht nicht hervor. In verschiedenen Museumskatalogen zum La Cour d'Or lassen sich diese auch nicht finden.³⁶ Einzig bei Klaus Grewe taucht eine ähnliche Fotografie mit der Bildunterschrift und dem Vermerk auf den Aufnahmeort „Metz (Frankreich), Wasserleitungsrohre als Fertigteile aus Gußbeton“ auf, eine Erklärung zu der Aufnahme bleibt allerdings aus (Abb. 3d).³⁷ Zwar ohne Bild, dafür im Text, erwähnt außerdem A. T. Hodge diese Fundstücke aus dem Museum in Metz als „*apparently quite unique*“ – also als „offenbar ziemlich einzigartig“. Er stellt außerdem die These auf, dass diese wohl in einem Siphon oder als Druckleitung zum Einsatz kamen.³⁸

Lamprecht beschreibt die Fundstücke mit einer Länge von drei Fuß, was umgerechnet etwa 95 cm entspricht. Die Außenform ist quaderförmig, die Breitseiten haben eine Länge von jeweils 21 cm auf 21 cm. Im Inneren des länglichen Quaders befindet sich eine zylinderförmige, längliche Öffnung mit einem Durchmesser von 6 bis 8 cm. An den Enden der einzelnen Teile ist jeweils ein Falz als Verbindungsstück angebracht: Bei einem Endstück geht an dieser Stelle die Quaderform in einen schmalen Zylinder über; dieser passt größentechnisch wiederum in die entsprechend breitere Öffnung des anderen Endes. So können die einzelnen Rohrstücke ineinander gesteckt werden, die Falze erleichtern die Dichtung der Teile. Somit entsteht eine funktionstüchtige Wasserleitung. Eine weitere Fotografie zeigt zudem ein Betonteil, das im Inneren ein Bleirohr enthält.³⁹

Fragestellung, Versuchsaufbau und Akteure

Das Experiment drehte sich um die zentrale Fragestellung: Wie stellt man einzelne Röhrenteile aus Beton her, deren Falze so ineinander passen, dass sie eine dichte Wasserleitung ergeben? Da der Versuchsaufbau dynamisch angelegt war, das heißt eine schrittweise Annäherung an die Lösung stattfinden sollte, ergaben sich aus dieser Leitfrage weitere Fragestellungen. Denn nach und nach zeigten sich Schwierigkeiten und erste Erkenntnisse darüber, welche Arbeitsschritte und Techniken nicht zielführend sind. Ganz nach dem Trial-and-Error-Prinzip mussten anfängliche Überlegungen daher verworfen und neue Ansätze gesucht werden. Es galt daher, die Rahmenbedingungen ent-

³⁶ Vgl. ADRIAN/BEAUX 2011 sowie SARY 1988.

³⁷ GREWE 1985, 58.

³⁸ HODGE 1992, 308.

³⁹ Vgl. LAMPRECHT 1985, 179.

sprechend zu verändern beziehungsweise anzupassen. Insgesamt wurden für das Experiment zwei Versuchsabläufe durchgeführt. Auf den gewonnenen Erkenntnissen des ersten Versuchs wurde aufgebaut und eine neue Herangehensweise für den Bau der Betonfertigteile ausprobiert. Da der Beton allerdings mindestens eine Woche aushärten muss,⁴⁰ um aus der Verschalung gelöst werden zu können, war der zeitliche Rahmen eine Herausforderung. Schließlich galt es diesen Zeitraum abzuwarten, um überprüfen zu können, ob das Experiment erfolgreich war. Das Experiment fand daher an zwei Wochenendterminen im Juli und August 2015 statt, zwischen denen eine Pause von vierzehn Tagen lag. So war sichergestellt, dass der verwendete Beton tatsächlich erhärtet war. Zudem konnte so auf Grundlage der ersten ausgehärteten Röhrenteile der nächste Versuch aufgebaut werden.

Abgesehen von kleinen Veränderungen sah der Versuchsaufbau im Wesentlichen gleich aus: An beiden Terminen wurden mehrere Gussformen gebaut, für das Befüllen vorbereitet, Betonmasse angerührt und zuletzt eingefüllt. Am darauffolgenden Termin wurde dann versucht, die Betonteile aus ihren Verschalungen zu lösen und auf ihre Funktionstüchtigkeit zu prüfen. Welche Arbeitsschritte dabei genau durchgeführt wurden, wird im Folgenden beschrieben.

Die Leitung des Experiments übernahm die Autorin, die sich bereits seit dem Wintersemester 2014/15 Schritt für Schritt der Materie Beton und dem Versuchsaufbau in der Theorie angenähert hatte⁴¹ und an beiden Wochenendterminen vor Ort war, um das Experiment durchzuführen und zu dokumentieren. Weiterhin zählte zum Projektteam Lisa Stanislawski. Sie war im Folgesemester hinzugestoßen, war allerdings durch einen komplizierten Sprunggelenkbruch außer Gefecht gesetzt und konnte so nur an einem Wochenende anwesend sein und dann hauptsächlich Arbeitsschritte im Sitzen durchführen. Tatkraftige und dringend notwendige Unterstützung erhielt die Autorin daher von den übrigen Seminarteilnehmern. Denn einige Arbeitsschritte - wie zum Beispiel das Anrühren der Betonmasse und das Transportieren der befüllten Gussformen - waren alleine nicht zu bewältigen.

⁴⁰ Die Zeit, bis der Beton erhärtet, hängt von verschiedenen Parametern ab, die sich oft nicht beeinflussen lassen, wie der Luftfeuchtigkeit und Außentemperatur. Bis er seine maximale Festigkeit erreicht hat, dauert es sogar 28 Tage. Vgl. SCHWABACH 2012, 45f.

⁴¹ Zur Vorbereitung diente unter anderem ein Beton-Workshop bei Marlene Kröhnert im Kulturpark West in Augsburg, bei dem die Grundtechniken der Arbeit mit Beton erlernt wurden.

Bau der Gussformen

Um die Betonmasse in die gewünschte Form zu bekommen, wurde sie in der Römerzeit in Schalungen aus Holzbrettern gegossen, die wiederverwendet werden konnten. An vielen Bauwerken zeigen sich noch Abdrücke der Holzmaserung, die nach Abnehmen der Verschalung zurückgeblieben sind.⁴²



Abb. 4: Arbeiten an den Gussformen

⁴² Vgl. LAMPRECHT 2001, 33.

Entsprechend der Maßangaben, die Lamprecht macht, galt es zunächst eine Negativform zu fertigen. Für den ersten Versuchsablauf wurden dafür MDF-Verschaltungsplatten mit einer Dicke von 1 cm verwendet. Da die Abdrücke der Platten aber eindeutig nach dem Herauslösen der Teile aus der Form auf deren Oberflächen zu sehen waren und für den Nachbau eines Fundes aus der Römerzeit nicht authentisch waren, wurde im zweiten Versuchsaufbau auf ungehobeltes Fichtenholz zurückgegriffen - auch diesmal hatten die Bretter eine Dicke von etwa 1 cm. Die Dicke der Verschalung musste bei der Konstruktion einberechnet werden, entsprechend größere Abmessungen waren hierbei zu machen. Die Außenschale der Negativform (97 cm x 23 cm x 23 cm) wurde dabei quaderförmig nach den Abmessungen der Fundstücke (95 cm x 21 cm x 21 cm) aus jeweils fünf verschieden großen Brettern gestaltet: Diese ließ man nach folgenden Angaben im Baumarkt zuschneiden: eine Unterseite (97 cm x 21 cm), zwei Längsseiten (97 cm x 23 cm) und zwei Breitseiten (21 cm x 22 cm). Oben wurde die Gussform offen gelassen, damit der Beton nach dem Befüllen an der Luft trocknen konnte und außerdem - so die Annahme - die Verschalung sich nach dem Trocknen leichter entfernen und wiederverwenden ließe. In eine der kleinen Breitseiten wurde zudem mithilfe einer Lochsäge ein Loch mit einem Durchmesser von 8 cm für das runde Falzende gebohrt; dieses Loch wurde schließlich mit einer Raspel gleichmäßig auf insgesamt 10 cm Durchmesser vergrößert. Alle Bretter der Außenschale wurden mit Schrauben miteinander verbunden.

Für die Innenform wurde ein 97 cm langer Holzpflöck verwendet, der später, nach dem Entfernen, den länglichen Hohlraum für das Rohr bilden sollte. Die größte Herausforderung sollte beim Bau der Gussform der Falz sein, da hierfür keine genauen Angaben von Lamprecht gemacht wurden und die genaue Funktionsweise sich nur anhand der Fotografien ableiten ließ. Hierfür wurde schließlich entschieden, die Negativform nicht aus Holz zu bauen, sondern auf andere Materialien zurückzugreifen: Für die eine Seite des Falzes wurde die Verschlusskappe eines Regenrohrs aus verzinktem Stahlblech verwendet. Diese hatte einen Durchmesser von 10 cm und ergab verschraubt mit dem Ende des Holzpflöcks eine Negativform für ein kurzes Röhrenstück mit einer Wanddicke von 1 cm. Für die andere Seite des Falzes wurde der Einfachheit halber ein Ende des Holzpflöcks solange mit einem etwa 7 cm breiten Kreppklebeband gleichmäßig umwickelt, bis dieses Ende schließlich einen Durchmesser von fast 10 cm hatte. Immer wieder wurde dabei überprüft, ob das umwickelte Ende in die Verschlusskappe passte. Sie soll-

te dabei weder zu locker noch zu fest sitzen. Der Holzpflöck mit den beiden Falzenden wurde schließlich mittig in der Außenschale platziert und mit Schrauben befestigt. Für den ersten Versuchsaufbau wurden insgesamt drei dieser Gussformen gebaut, für den zweiten nur noch zwei. Dabei wurden am Bau der Verschalungen keinerlei Veränderungen vorgenommen.

Mischen der Betonmasse und Befüllen der Gussformen

Um die passende Menge an Beton für die Fertigbetonteile anzurühren, musste zunächst das Volumen analysiert werden, das eine Gussform fassen konnte. Dabei wurde das Volumen des gesamten Quaders berechnet, von diesem Wert wurde dann das Volumen des zylinderförmigen Hohlraums abgezogen.⁴³ Das Volumen einer Gussform setzte sich also aus diesen Einzelberechnungen zusammen:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{Gussform}} &= V_{\text{Quader}} - V_{\text{Zylinder}} \\
 &= 95 \text{ cm} \times 21 \text{ cm} \times 21 \text{ cm} - \pi \times 4 \text{ cm}^2 \times 97 \text{ cm} \\
 &\approx 41895 \text{ cm}^3 - 4875 \text{ cm}^3 \\
 &\approx 37110 \text{ cm}^3 \\
 &\approx 37,11 \text{ l}
 \end{aligned}$$



Abb. 5: Die Hauptbestandteile des Römischen Betons (v.l.n.r.): Kalk, Vulkanasche, Zuschlag aus Vulkangestein und Ziegelsplittern.

Entsprechend dieser Berechnungen musste für den ersten Versuchsablauf mit drei Gussformen 111,33 Liter Betonmasse angerührt werden, für den zweiten mit nur zwei Gussformen nur noch 74,22 Liter - wobei hier jeweils aufgerundet wurde, um sicherzugehen,

⁴³ Das nur sehr geringe Volumen der Falzverbindung wurde in diese Rechnung nicht einbezogen.

dass die Betonmasse auch ausreicht. Nach den Analysen des Forschungsteams um Marie Jackson machen 45 bis 55 Prozent der Betonmasse, also in etwa die Hälfte, die Zuschläge aus, den Rest die Mörtelmasse aus Vulkanasche, Kalk und Wasser (Abb. 5).⁴⁴ Entsprechend musste also die Hälfte des zuvor berechneten Volumens als Mörtelmasse hergestellt werden; bei diesem Konglomerat macht die Vulkanasche rund 85 Prozent, also für den ersten Versuch rund 47 Liter, für den zweiten rund 42 Liter aus.

Die Beschaffung der Vulkanasche gestaltete sich zunächst schwierig: Eine Recherche im Internet ergab, dass dieses Material in minimalen Dosierungen, dafür aber sehr teuer über verschiedene Kosmetik-Onlineshops vertrieben wird, da man sich von ihr eine hautverbessernde Wirkung verspricht. Auch als Düngezusatz für Gartenerde wird Vulkanasche verwendet und ebenso teuer und in kleinen Mengen verkauft. Auch auf Anfrage bei mehreren Baumärkten hieß es zunächst, dass sie diese nicht im Sortiment hätten. Erst später stellte sich heraus, dass man schlichtweg nach dem im Baugewerbe wesentlich gebräuchlicheren Begriff „Puzzolan“ hätte suchen und fragen müssen. Letztlich löste sich das Problem aber gleichsam von selbst, da mehrere Säcke Puzzolan-Zement im APC von früheren Bauarbeiten - wohl bei der Gestaltung der Wasserrinne am Kinderspielplatz - übrig geblieben waren. Diese konnten ebenso wie ein bereits vorhandener Sack Kalk für das Experiment verwendet werden, die Materialien für den Zuschlag wurden aus dem Baumarkt besorgt. Dabei entschied man sich für eine bunte Mischung: Brocken aus schwarzem und rötlichbraunem Vulkangestein und Ziegelbruch. Für letzteren wurden Ziegelschalen benutzt, die dann mit einem Hammer in kleine Stücke zerbrochen wurden (Abb. 6).

Entsprechend der oben beschriebenen Berechnungen verwendete man für die ersten drei Betonfertigteile zweieinhalb Säcke Puzzolanzement (ein Sack à 25 kg entspricht in etwa einem Volumen von 20 l), für den zweiten Versuchsablauf mit nur noch zwei Teilen zwei Säcke. Der Kalk wurde mit Plastikbechern abgemessen und dem Puzzolan zugegeben (erster Versuch: etwa 8 l, zweiter Versuch: etwa 5,5 l). In einer runden Kunststoffwanne wurden die beiden Materialien schließlich mit Wasser zu einem relativ flüssigen Mörtelgemisch zusammengerrührt. Hierbei wurde zunächst ein Bohrer mit einem speziellen Rühraufsatz verwendet, da dieser beim zweiten Wochenendtermin nicht mehr verfügbar war, wurde dann zum Mischen ein Spaten zur Hand genommen. Nach und nach wurden schließlich die Zuschläge untergehoben, bis alles gleichmäßig vermengt

⁴⁴ Vgl. YARRIS 2014.

war und die gesamte Masse mit Maurerkellen auf die einzelnen Gussformen verteilt werden konnte (Abb. 6).



Abb. 6: Zerkleinern der Ziegelplatten und Befüllen der Gussform mit der Betonmischung

Wie kommt der Beton wieder aus der Form?

Schwierigkeiten und Ergebnisse des Experiments

Als Problem stellte sich das Entfernen der Verschalungen nach Erhärten der Betonteile heraus. Zwar hatte man die Gussformen im ersten Versuch vor dem Befüllen mit der Betonmasse mit Sprühfett aus dem Baumarkt behandelt. Doch nach einer Woche Trockenzeit half alles Schütteln und Rütteln nichts: Während sich die Außenschalen mit etwas Kraftaufwand noch lösen ließen, ließ sich der Holzpflöck im Inneren des Betonquaders schlichtweg nicht herausziehen. Beim Versuch, ihn mit einem Hammer herauszuschlagen, bewegte er sich keinen Millimeter. Auch durch Herausbrennen ließ sich das Holz nicht entfernen, da der Flamme im schmalen Hohlraum die notwendige Luftzufuhr fehlte. Insofern ergab sich aus dieser Schwierigkeit eine neue Fragestellung für das Experiment: Wie behandelt man den Holzpflöck im Inneren vor dem Befüllen, so dass er sich nach dem Erhärten entfernen lässt? Beziehungsweise: Mit welchen Techniken lässt sich der Holzpflöck im Nachhinein vielleicht doch noch herauslösen? Eignet sich der Holzpflöck überhaupt als Bestandteil der Gußform? - Oder muss hier auf ein anderes Material beziehungsweise einen anderen Holztyp zurückgegriffen werden, zum Beispiel fällfeuchtes Holz, da dieses noch austrocknet und dabei an Umfang verliert?



Abb. 7: Fertige Betonform mit einbetoniertem Holzpflock

Diesem Problem wollte man im zweiten Versuchsablauf entgegenwirken und veränderte daher den Versuchsaufbau in folgenden Punkten: Zum einen wässerte man die Holzpflocke über eine Woche lang in einem mit Wasser befüllten Blumenkasten. Durch diesen Arbeitsschritt sollte sich das Holz mit Wasser vollsaugen und an Umfang gewinnen. Später sollte der Pflock während des Trocknens diesen Umfang wieder verlieren und sich dadurch besser aus dem Beton lösen lassen. Zum anderen ging man davon aus, dass die dünne Schicht Sprühfett nicht ausgereicht hatte, entsprechend entschied man sich für eine wesentlich dickere Schicht. Dafür verwendete man diesmal einen 1 Kilo schweren Block Pflanzenfett. Dieses Fett wurde zunächst auf den Holzpflock und den Falz, danach auf die Innenseiten der Gussformen gleichmäßig aufgetragen, bevor die Außen- und Innenverschalung mit Schrauben zusammengebaut wurden.



Abb. 8: Einfetten der Holzpflocke für die Gussform

Außerdem wurde ein weiteres Problem beim Entfernen der Außenverschalung sichtbar: An den Enden war die Betonmasse nicht vollständig in die Falzöffnung gelaufen, entsprechend war diese nach Erhärten des Betons nicht funktionstüchtig und hätte somit keine dichte Verbindung zwischen zwei Fertigteilen ergeben. Beim zweiten Versuchsaufbau wurde daher beim Befüllen der Gussformen besonders darauf geachtet, dass zuerst der Falz mit der feuchten Masse versehen wurde. Mit den Fingern drückte man den Beton in die Öffnung. Dabei passte man auf, dass keine zu großen Brocken des Zuschlags dazwischengerieten und diese versperren. Dieses Vorgehen zeigte Erfolg, die Falzenden fielen beim zweiten Lösen der Verschalungen wesentlich sauberer aus.

Weniger erfolgreich dagegen war das Entfernen der Holzpflocke: Wie beim ersten Versuch auch ließen sie sich nicht bewegen. Insofern kann als Fazit festgehalten werden, dass eine Fortführung des Experiments notwendig ist, um eine Lösung für das Problem zu finden. Denn bei diesem Versuchsaufbau konnten nur zwei Möglichkeiten ausprobiert werden, es gibt aber sicherlich noch zahlreiche andere, die Aufschluss über die Herstellung der Fertigbetonteile geben könnten. So wurden Überlegungen angestellt, einen leicht konisch verlaufenden Holzpflock zu verwenden, der sich durch seine Form besser vom erhärteten Beton entfernen lässt. In diesem Fall müsste aber auch der Falz entsprechend angepasst werden. Eine andere Überlegung ist, Grünholz dafür zu verwenden, das keine feinen Ritzen aufweist, beziehungsweise die Oberfläche des Holzes durch Materialien wie Wachs so glatt zu gestalten, dass keine Betonmasse in die kleinen Zwischenräume fließen und dort erhärten kann. Das Wachs wäre wohl brüchig genug, um den Pflock einfach so herausschlagen zu können, wenn die Wachsschicht nur dick genug ist.

Aber dies sind nur drei Alternativen zu den bereits durchgeführten Versuchsaufbauten, die zu weiteren archäologischen Experimenten anregen sollen und zusätzliche Erkenntnisse über die Herstellung der Betonfertigteile liefern können.

Abschließend lässt sich sagen, dass durch das Experiment dennoch zahlreiche Erkenntnisse gewonnen werden konnten - besonders was die Herstellung der Betonmasse und ihre Verwendung betrifft. Die analysierten und für den Versuchsaufbau eingesetzten Materialien ließen sich ohne besonderen technischen Aufwand zu einem Konglomerat vermischen und in die Gussformen einfüllen. Dieses erhärtete schließlich schnell und vollständig. Daraus lässt sich schließen, dass wohl auch schon zur Römerzeit der Beton

auf diese Weise angerührt wurde. Beim Bau der Gussformen dagegen bleibt die Frage nach dem genauen Arbeitsablauf und der tatsächlichen Verwendung der Materialien noch offen. Diese könnte erst durch weitere Experimente geklärt werden.

Quellenausgaben

CAIUS PLINIUS SECUNDUS D. Ä., Naturkunde, 37 Bde., hg. und übers. von R. König/G. Winkler (Zürich u. a. 1990–2004).

VITRUVIUS, Zehn Bücher über Architektur, hg., übers. und mit Anmerkungen versehen v. C. Fensterbusch (Darmstadt 1981).

Literatur

- Adrian/Beaux 2011: A. ADRIAN/L. BEAUX, Metz. La Cour d’Or. Visages d’un musée (Paris 2011).
- Cech 2011: B. CECHE, Technik in der Antike (2. Aufl. Darmstadt 2011).
- Cichorius 1896: C. CICHORIUS, Die Reliefs der Traianssäule (Berlin 1896).
- Deichmann 1979: F.W. DEICHMANN, Westliche Bautechnik im römischen und römischen Osten, in: Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Römische Abteilung 86 (1979) 473-527.
- Gauer 1977: W. GAUER, Untersuchungen zur Trajanssäule, Erster Teil. Darstellungsprogramm und künstlerischer Entwurf (Berlin 1977).
- Grewe 2014: K. GREWE, Aquädukte. Wasser für Roms Städte. Der große Überblick - vom Römerkanal zum Aquäduktmarmor (Rheinbach 2014).
- Grewe 1985: K. GREWE, Planung und Trassierung römischer Wasserleitungen. Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft Suppl. 1 (Wiesbaden 1985).
- Hodge 1992: A.T. HODGE, Roman Aqueducts & Water Supply (2. Aufl. London 1992).
- Lamprecht 2001: H.O. LAMPRECHT, Opus Caementitium. Bautechnik der Römer (5. Aufl. Düsseldorf 2001).
- Lamprecht 2000: H.O. LAMPRECHT, Opus Caementitium. DNP 8 (2000) 1274-1276.

-
- Lamprecht 1989: H.O. LAMPRECHT, Verwendung von Beton bei Wasserbauten in der Antike. Mitteilungsblätter der Bundesanstalt für Wasserbau 65 (Karlsruhe 1989).
- Lohaus u.a. 2014: L. LOHAUS/T. STEINBORN/C. BEGEMANN, Beton - alter Baustoff neu entdeckt. Innovative Betone ermöglichen neue Anwendungen und eine gesteigerte Nachhaltigkeit, in: Neue Materialien 1/2 (2014) 34-37.
- Mogetta 2015: M. MOGETTA, A New Date for Concrete in Rome, in: The Journal of Roman Studies 105 (2015) 1-41.
- Mogetta 2013: M. MOGETTA, The Origins of Concrete in Rome and Pompeii (Diss. University of Michigan 2013).
- Sary 1988: M. SARY, La Cour d'Or. Trésors du Musée de Metz (Metz 1988).
- Schwabach 2012: E. SCHWABACH, Ausführung von Tragwerken aus Beton: Konsolidierte und kommentierte Fassung von DIN EN 13670 und DIN 1045-3 für die Praxis (Berlin 2012).
- Sinn 1993: B.H. SINN, Und machten Staub zu Stein. Die faszinierende Archäologie des Betons von Mesopotamien bis Manhattan (Düsseldorf 1993).
- Stutzinger 2012: D. STUTZINGER, Baugewerbe: Opus Caementitium und die Ziegelindustrie, in: E. Wamers (Hg.), Griechen, Etrusker und Römer. Eine Kulturgeschichte der antiken Welt im Spiegel der Sammlungen des Archäologischen Museums Frankfurt (Regensburg 2012) 369-375.
- Weeber 2010: K.-W. WEEBER, Rom sei Dank! Warum wir alle Caesars Erben sind (Frankfurt am Main 2010).
- Yarris 2014: L. YARRIS, Back to the Future with Roman Architectural Concrete. Research at Berkeley Lab's Advanced Light Source Reveals Key to Longevity of Imperial Roman Monuments, 15. Dez. 2014:
<http://newscenter.lbl.gov/2014/12/15/roman-architectural-concrete/> (letzter Aufruf am 24.02.2016).

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: © R. KALTSCHMIDT, in: L. Yarris: Back to Future with Roman Architectural Concrete. Research at Berkeley Lab's Advanced Light Source Reveals Key to Longevity of Imperial Roman Monuments, 15. Dez. 2014:
<http://newscenter.lbl.gov/2014/12/15/roman-architectural-concrete/> (letzter Aufruf am 24.02.2016).
- Abb. 2: H.O. LAMPRECHT, *Opus Caementitium. Bautechnik der Römer* (5. Aufl. Düsseldorf 2001) 54.
- Abb. 3a-c: H.O. LAMPRECHT, *Opus Caementitium. Bautechnik der Römer* (Düsseldorf 1985) 179.
- Abb. 3d: K. GREWE, *Planung und Trassierung römischer Wasserleitungen. Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft Suppl. 1* (Wiesbaden 1985) 59.
- Abb. 4-8: Eigene Bilder.

Herstellung eines Wasserleitungsrohres aus Blei

Tobias Häring

„Diese Annehmlichkeit, die Idylle hat eins nicht: einen Springbrunnen.“¹

Plinius der Jüngere beklagt sich in einem Brief an seinen Freund Gallus, dass ihm in seiner scheinbar perfekten Villa nahe Ostia nur eines zu seiner vollkommenen Zufriedenheit fehle - ein Springbrunnen. Es kann daher guten Gewissens behauptet werden, dass fließendes Wasser im Haus Lebensqualität bedeutete. Für einen solchen Springbrunnen wäre allerdings eine Druckleitung von Nöten, die im Allgemeinen aus Blei gefertigt war.² Bei der Beschäftigung mit den Arten römischer Wasserleitungen darf also der Typus des Bleirohres nicht fehlen. Wie aber wurden solche Rohre hergestellt? Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, sollte im Rahmen eines Archäologischen Experimentes durch den Nachbau eines römischen Wasserleitungsrohres aus Blei der Fertigungsprozess nachvollzogen werden - vom Rohmaterial bis zum einsatzfähigen Rohr. Ziel des Experiments war es, einen Einblick in den Herstellungsprozess zu erhalten, über den sich die literarischen Quellen weitgehend ausschweigen. Darüber hinaus galt es herauszufinden, wie sich die Herstellung gestaltet, um einen Eindruck davon zu erhalten, unter welchen Prämissen eine Massenproduktion gewährleistet werden konnte.

Der Werkstoff Blei

Blei eignet sich für den Bau von Rohren in erster Linie deshalb sehr gut, weil es eine geringe Härte aufweist und daher einfach in Form zu bringen ist. Es ist witterungsbeständig und mit seinem niedrigen Schmelzpunkt von 327°C einfach zu schmelzen und zu gießen. Darüber hinaus war Blei in der Antike in großen Mengen verfügbar, da es neben dem gezielten Abbau auch als Nebenprodukt in der Silbergewinnung übrig blieb.³ Auch der wirtschaftliche Aspekt ist nicht außer Acht zu lassen, denn Blei war verhältnismäßig günstig.⁴ Der große Nachteil von Blei ist dessen Toxizität, die auch in der An-

¹ Plin. epist. 2,17,25.

² Vgl. SCHNEIDER 1997, 708.

³ Vgl. BLÜMMER 1897, 561.

⁴ Plin. nat. hist. 34,160f; Plinius nennt als Preis für „schwarzes Blei“ (also das, was wir heute als Blei verstehen) einen Preis von 7 Denaren pro Pfund (~325 g). Zum Vergleich wird das Pfund „weißes Blei“ (Zinn) mit 80 Denaren und eine 2/3-Blei-Zinn-Legierung mit 20 Denaren angegeben.

tike bereits bekannt war.⁵ Entsprechende Passagen in den Quellen führten in der Forschung über einen langen Zeitraum hinweg zu der Überzeugung, dass die Römer wegen der Wasserversorgung durch Bleirohre unter einer chronischen Bleivergiftung litten,⁶ die letztendlich für den Untergang des römischen Reiches sorgen sollte. Diese Meinung hielt sich in der Forschung hartnäckig und wurde erst 1985 endgültig *ad acta* gelegt und wird seitdem weitgehend abgelehnt.⁷ Auch wenn der Exkurs in die Forschungsgeschichte nicht essentiell für dieses Thema ist, erscheint er nach den Erfahrungen während der Durchführung des Experiments nötig, denn diese These scheint in den Köpfen nach wie vor fest verankert zu sein. Der Bleigehalt von Leitungswasser ist im Wesentlichen abhängig von der Härte des Wassers, der Verweildauer in der Leitung und der Temperatur. Je härter (also kalkhaltiger) das Wasser ist, desto geringer ist die Löslichkeit des Bleis; darüber hinaus bildet stark kalkhaltiges Wasser eine schützende Sinterschicht an der Innenseite des Rohres. Abgesehen von den Leitungen innerhalb eines Privathauses war ein stetiger Durchfluss des Wassers durch die Leitungen vorgesehen. Anzumerken ist darüber hinaus, dass über Kosmetika⁸ und Lebensmittel⁹ weit mehr Blei aufgenommen wurde, als über das Trinkwasser. Aufgrund dieser Umstände kann mit gutem Gewissen postuliert werden, dass Trinkwasser aus Bleileitungen nicht zu einer chronischen Bleivergiftung geführt hat.¹⁰

Vorbereitende Überlegungen

Die ersten Überlegungen zur Planung des Experiments umfassten folgende Punkte:

- 1) Abmessungen der Bleiplatte;
- 2) Gusstechnik;
- 3) Formgebung.

⁵ Vit. 8,6,11; Plin. nat. hist. 34,167.

⁶ Vgl. KOBERT 1909, 103-119; HODGE bezeichnet diese Publikation als Stein des Anstoßes für diese These, vgl. Hodge 2002, 465.

⁷ Vgl. NEEDLEMAN 1985, 63-94.

⁸ Siehe zum Beispiel Ov. medic. 73; Plin. nat. hist. 34,176.

⁹ Colum. 12,19f.

¹⁰ Vgl. etwa zusammenfassend CECH 2011, 143f.

Über den ersten Punkt geben uns die Quellen reichlich Aufschluss. Die Rohre waren normiert. Vitruvius nennt einige Beispiele für Länge, Breite und Gewicht der jeweiligen Platten.¹¹ Frontinus bestätigt dieses System und nennt Vitruvius als den mutmaßlichen Urheber.¹² Er beschreibt eine Anzahl von insgesamt 25 Rohrkalibern,¹³ und versucht dabei mehr oder weniger erfolgreich zu ergründen, wie konsistent dieses System sei.¹⁴ Dank dieser Beschreibungen wissen wir, dass „die Röhren nicht weniger als 10 Fuß [296 cm] lang gegossen werden“ und „fünfhundertzöllig ein Gewicht von 600 Pfund“ haben sollen, wobei zu beachten ist, dass die Röhren ihre „Größenbezeichnung (...) nach der Zahl der Zoll, die die Platten breit sind, bevor sie zur Röhre zusammengebogen werden“, bekommen.¹⁵ Die zahlreichen Funde bestätigen, dass diese Normierung konsequent verfolgt wurde.¹⁶ Dies gilt zumindest für Länge und Durchmesser. Die Wandstärke (und damit das Gewicht) dagegen unterscheidet sich zum Teil erheblich. Zur Gusstechnik stellt uns die Quellenlage vor ein Problem. Vitruvius beschreibt die Abmessungen der Rohre und springt im darauffolgenden Satz zur Trassierung einer Bleileitung.¹⁷ Dies erweckt den Eindruck, als sei der Prozess der Herstellung so trivial, dass er nicht erwähnenswert ist.

Möchte man sich jedoch dem Herstellungsprozess annähern, stellt sich zuerst die Frage, auf welchem Untergrund gegossen wurde.¹⁸ Als Möglichkeiten stehen im Wesentlichen Stein/Marmor, gestampfter Lehm Boden und Gießsand im Raum.¹⁹ Eine Gussform aus Stein scheidet aus, da bislang keine Funde ans Licht kamen, die auf eine solche Form hindeuten und das Anbringen eines Stempels - römische Bleirohre verfügten im Allgemeinen über einen Stempel, der entweder auf den Kaiser/Konsul/Statthalter, den Her-

¹¹ Vitr. 8,6,4.

¹² Frontin. aqu. 25.

¹³ Frontin. aqu. 39-63.

¹⁴ Frontin. aqu. 27-33.

¹⁵ Vitr. 8,6,4.

¹⁶ Vgl. TÖLLE-KASTENBEIN 1990, 90.

¹⁷ Vitr. 8,6,4. Die Beschreibung des Gussvorgangs beschränkt sich auf die Nennung der Abmessungen und die Information, dass eine Platte gegossen und gebogen wird.

¹⁸ Interessanterweise erscheint auch den meisten Forschern diese Frage so trivial, dass darauf in den wenigsten Fällen eingegangen wird: In den Untersuchungen führender Forscher auf dem Gebiet römischer Wasserleitungen im Allgemeinen und Bleirohren im Speziellen finden sich darauf keine Hinweise, vgl. etwa GREWE 2014 und BRUUN 1991.

¹⁹ Vgl. HODGE 2002, 309.

steller oder den Besitzer verwies²⁰ - ein aufwändiges Unterfangen wäre. Gegen gestampften Lehm spricht, dass man keine bewegliche Form hätte, was wiederum die Wartung erschwerte: Sollte die Form zu Bruch gehen, müsste sie neu gebaut werden. Gießsand scheint die wahrscheinlichste Variante zu sein.²¹ Im Zuge der Recherchen erschien es naheliegend in einen noch existierenden Handwerkszweig zu blicken, der sich ebenfalls mit der Herstellung von Bleirohren beschäftigt - den Orgelbau.

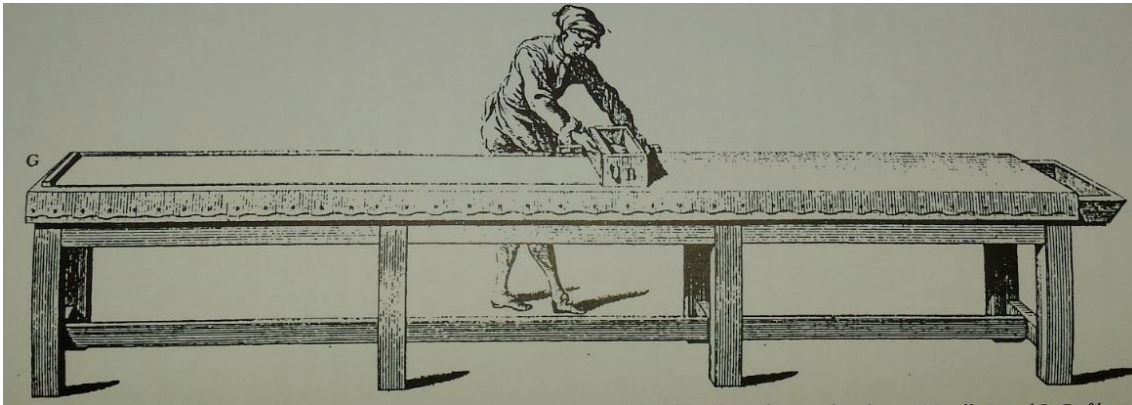


Abb. 1: Waagrechter Gussrahmen mit Leinenbespannung und Schlitten

Die Rahmenbedingungen in der Instrumentenherstellung sind um einiges strikter, da die an den Tag zu legende Genauigkeit bedeutend höher ist. Hier wird das flüssige Metall auf eine waagrecht gespannte Leinwand gegossen, die auf einen Holzkasten aus Apfel-, Birnen-, Kirsch-, Pflaumen oder Ebereschenholz gespannt ist. Das Metall wird mit Hilfe eines Schlittens aufgebracht (Abb.1),²² wobei auch die Technik mit Gießsand Anwendung findet, auch wenn sie als weniger fortschrittlich bezeichnet wird.²³ Reines Blei ist für den Orgelbau untauglich.²⁴ Stattdessen wird eine Blei-Zinn-Legierung oder reines Zinn verwendet. Da Zinn allerdings einen deutlich niedrigeren Schmelzpunkt hat als Blei (232°C), hält die Bespannung dem stand, darf allerdings auch nicht zu heiß werden.²⁵ Damit scheidet diese Methode aus. Publikationen aus dem historisch-archäologi-

²⁰ Vgl. BREKLE 2010, 419; HODGE 2002, 311.

²¹ So auch HODGE 2002, 466.

²² Vgl. ELLERHORST 1986, 116-119; REICHERT 1995, 91-94.

²³ Siehe REICHERT 1995, 94.

²⁴ Vgl. ELLERHORST 1986, 119.

²⁵ Vgl. ELLERHORST 1986, 117; REICHERT 1995, 91.

schen Bereich zeigen weitere Gusstechniken wie einen einseitigen Zulauf über eine Rampe (Abb. 2) oder eine seitlich angebrachte Rinne mit mehreren Zuläufen (Abb. 3).²⁶

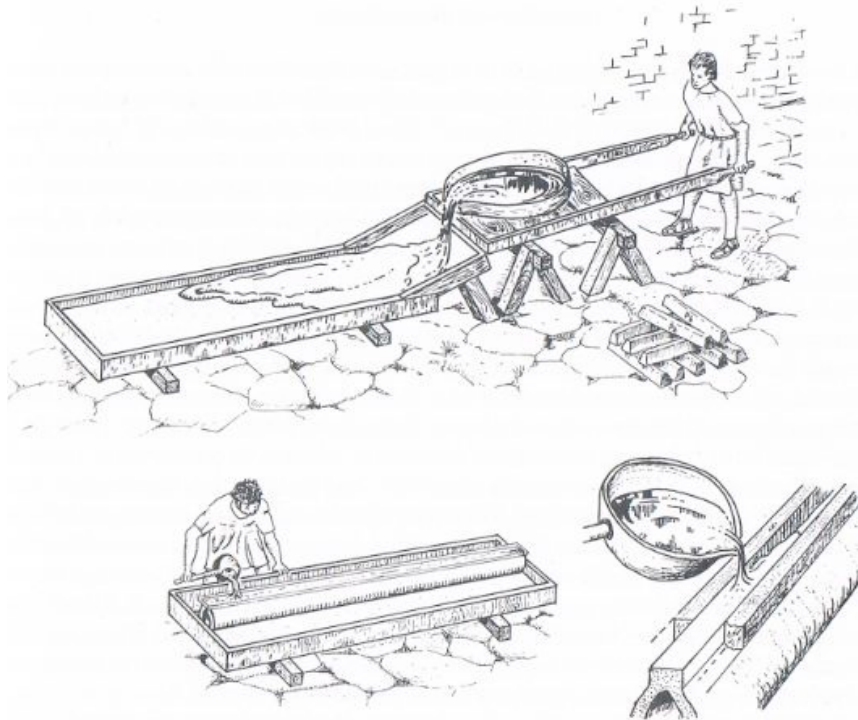


Abb. 2: Einseitiger Zulauf über eine Rampe

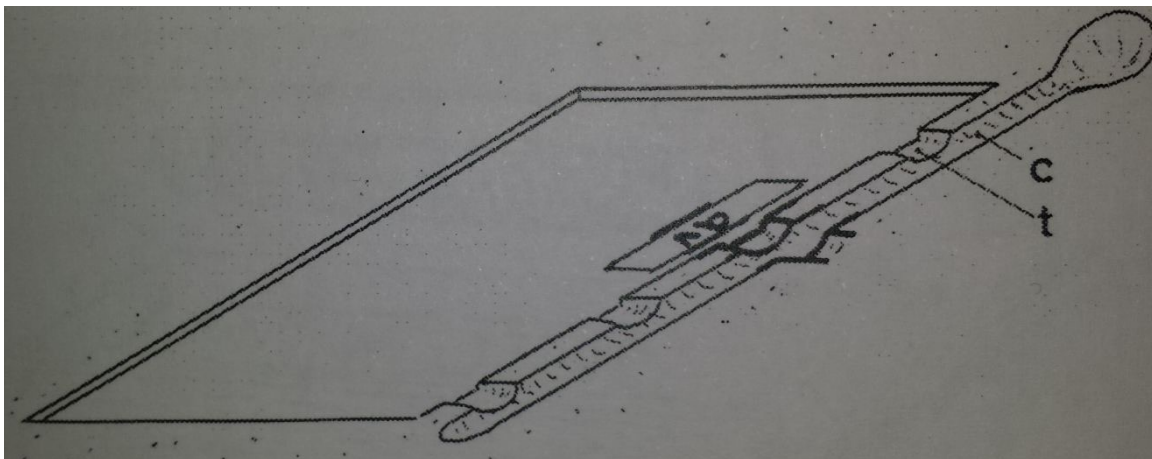


Abb. 3: Seitlicher Zulauf

²⁶ Vgl. BREKLE 2010, 421; HODGE 2002, 309. Die Abbildungen werden bei beiden Autoren nicht weiter kommentiert, sondern lediglich als Beispiele für Gusstechniken angeführt.

Mit Blick auf die Rahmenbedingungen und die zur Verfügung stehenden Ressourcen fiel die Entscheidung, dass ein hölzerner Rahmen mit einem Sandbett zur Anwendung kommen sollte. Nun stellte sich die Frage, wie der Stempel für die Inschrift angebracht und was für ein Inschriftentext überhaupt gewählt werden sollte. Durch die Inschrift sollte ein Lokalbezug zum römischen Kempten hergestellt werden. Zu diesem Zweck wurden die dort gefundenen Inschriften in Augenschein genommen und die Wahl fiel auf einen der wenigen Namen einer Privatperson, der komplett erhalten ist - Lucianus Ingenus. Der Name stammt allerdings nicht von einem Bleirohr, sondern von einer Grabinschrift, die der Besagte für seinen Sohn errichten ließ.²⁷ Als Stempelvorlage ergab sich damit LVCIANII INGENVI. Wie eine solche Inschrift auf einem Bleirohr angebracht werden kann, ist ein Thema für sich.²⁸ Letztendlich kamen für das Experiment drei verschiedene Möglichkeiten in Frage:

- 1) Seitenverkehrtes Einritzen in das Sandbett;
- 2) Volltextstempel;
- 3) Einzelne Buchstaben in einer Setzkassette.

Da der Volltextstempel wohl die gängigste Praxis war, sollte ein solcher auch hier zur Anwendung kommen. Dabei wurde die Inschrift auf einen (Holz-)Stempel aufgebracht und in das Gussbett eingedrückt (Abb. 4). Hier konnte es auch zu Fehldrucken kommen, deren Ergebnis eine doppelte Prägung war²⁹. Da sich die Fertigung eines solchen Stempels als deutlich zeitaufwändiger herausstellte als ursprünglich angenommen, wurde im Experiment die Schrift mit Hilfe eines Stechmeißels direkt in den Sand geprägt (Abb. 5). Was die letztendliche Formgebung betrifft, ist sich die Literatur einig, dass die Bleiplatte um ein Rundholz gewickelt und anschließend je nach Typ verschlossen wurde (Abb. 6).³⁰

²⁷ CIL III 5771 = CIL III 11885 = IBR 79.

²⁸ BREKLE 2010, 419-437 behandelt dieses Thema erschöpfend.

²⁹ Vgl. BREKLE 2010, 432.

³⁰ HODGE 2002, 311.

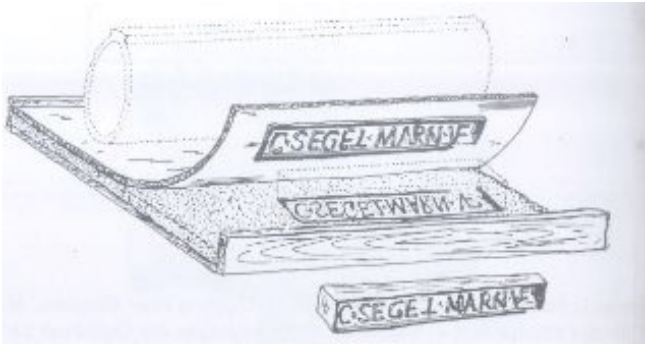


Abb. 4: Anbringung des Stempels in der Gussform



Abb. 5: Volltextstempel: Vorlage und eingeritzte Schrift

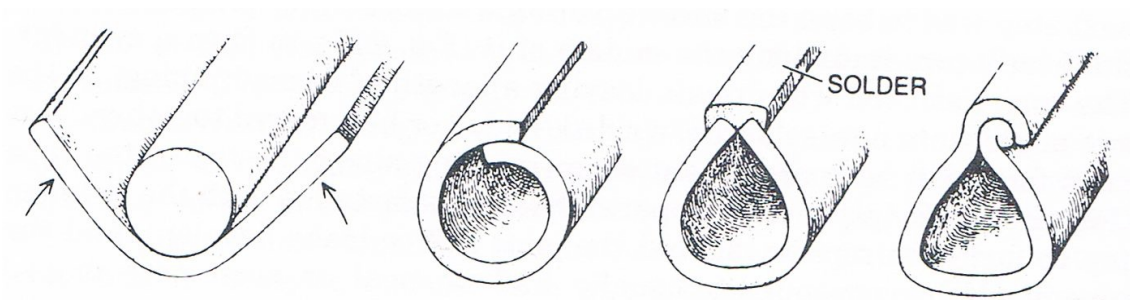


Abb. 6: Verschiedene Verschlussformen

Der Versuchsaufbau

So viel zum theoretischen Teil. Nun ist es an der Zeit, ein Zwischenfazit zu ziehen und den geplanten Versuchsaufbau und die Ziele zu skizzieren.

Das Ziel war die Herstellung eines Kaliber-10-Rohres³¹, das eine Platte mit einer Länge von 10 Fuß (296 cm) und eine Breite von 10 *digiti* (18,5 cm) benötigte. Vitruvius gibt für ein solches Rohr ein Gewicht von 120 Pfund (39 kg) an.³² Daraus ergibt sich eine zu erwartende Wandstärke von 6,3 mm. Darüber hinaus wurde eine Verlustmarge von 1 kg Blei einkalkuliert (falls zum Beispiel etwas neben die Form gegossen wird oder im Topf verbleibt). Als Gussrahmen diente ein Holzkasten aus gehobelter Fichte. Abweichend von den Angaben aus dem Orgelbau wurde ein Nadelholz verwendet, da es sich leichter verarbeiten lässt und mit Blick auf das Budget die sinnvollste Alternative war. Schließlich waren nur wenige Gussversuche geplant und die weiter oben genannten Holzarten sollen lediglich eine Langlebigkeit der Gussform sicherstellen.³³ Gefüllt wurde die Form mit handelsüblichem Gießsand. Als Gusstopf diente ein Edelstahltopf mit einem Fassungsvermögen von fünf Litern, der mit Hilfe von zwei Metallstangen, die durch Schlauchschellen an den Griffen befestigt wurden, transportiert und gekippt werden konnte. Die Handhabung erforderte zwei Personen. Zum Formen war ein Rundholz mit einem Durchmesser von 4,8 cm vorgesehen.

Für den Bau des Rahmens wurden moderne Hilfsmittel (Spaxschrauben und Metallwinkel) verwendet, da dies mit Blick auf den Schwierigkeitsgrad der Herstellung und die vorhandene Zeit die pragmatischste Lösung zu sein schien und darüber hinaus das Ergebnis des Experiments nicht verfälschte.

Die Durchführung des Versuchs erfolgte an insgesamt drei Wochenenden im Archäologischen Park Cambodunum (Kempten). Insofern war auch Zeit eine rare Ressource, wie wir bei der Durchführung des Experiments feststellen mussten. Das erste Wochenende entfiel darauf, den Rahmen zu bauen und den Guss vorzubereiten, während die anderen beiden Wochenenden dazu gedacht waren, wenigstens zwei Güsse anzufertigen.

³¹ Siehe Frontin. aqu. 43.

³² Vitruv 8,6,4.

³³ ELLERHORST 1986, 117; REICHERT 1995, 91.

Der erste Versuch

Nachdem die entsprechenden Vorbereitungen getroffen waren, war es an der Zeit den ersten Versuch zu starten. Bereits das Anlegen des Sandbetts stellte sich als eine enorme Hürde dar. Das Befüllen, Verdichten und Planieren erschien im Vorfeld als trivialer Arbeitsschritt, der damit endete, dass zwei Personen einen ganzen Nachmittag beschäftigt waren. Dies war sicherlich nicht zuletzt dem erstmaligen Verrichten dieser Tätigkeit geschuldet. Auch das Schmelzen des Bleis war mangels Schmelzofen langwieriger als erwartet. Bereits gegen Mittag wurde begonnen eine Glut zu erzeugen, um darin das Blei im Topf zu verflüssigen. Mit der herannahenden Dämmerung beschlossen wir, den ersten Gussversuch zu wagen, auch wenn unser Sandbett noch einige Unebenheiten aufwies.

Wir entschlossen uns dazu, das flüssige Blei seitlich auf Höhe der Mitte der Form einströmen zu lassen, in der Hoffnung, dass es sich bis in die Ecken verteilen würde. Grundsätzlich hätte das wohl auch funktioniert, allerdings waren die Unebenheiten im Sandbett gravierender als angenommen. Die Bleimenge war schlicht nicht ausreichend, um dies zu kompensieren und so erhielten wir unvollständiges, an den äußeren Enden ausgefranstes Blech, das an seinen dicksten Stellen mehr als 1 cm stark war und sich damit nicht mehr hätte problemlos biegen lassen. Einzig das Ergebnis der Inschrift war zufriedenstellend (Abb. 7).



Abb. 7: Inschrift auf der Platte des ersten Versuchs

Bei der Evaluierung des ersten Gussversuchs lassen sich folgende Dinge festhalten: Der Schritt von der Theorie zur Praxis kann äußerst ernüchternd sein. Arbeitsschritte wie das Anlegen des Gussbetts, die im Vorfeld als simpel und trivial erschienen, entpuppten sich als anstrengend und zeitraubend. Die Flussfreudigkeit des Bleis war überraschend gut. Das flüssige Blei hätte sich aller Wahrscheinlichkeit nach bis in alle Ecken der Form verteilt, wenn die oben genannten Probleme eliminiert gewesen wären. Das Zeitfenster bis zum Erstarren des Bleis war mit weniger als 20 Sekunden dagegen kürzer als erwartet.

Der zweite Versuch

Mit den Vorbereitungen des zweiten Versuchs wurde bereits am Vormittag begonnen, um nicht erneut unter Zeitdruck zu geraten. Mit dem Wissen, worauf beim Präparieren des Sandbetts zu achten war, gelangte man nun zu einem deutlich besseren Ergebnis.

Da die Gusstechnik des ersten Versuchs recht wahrscheinlich zum gewünschten Ergebnis geführt hätte, haben wir uns dazu entschieden, eine andere Technik zu testen, um mehr Erkenntnisse zu gewinnen. Der Topf sollte diesmal über der Form entlang gezogen werden und mit einem konstanten Fluss die Form füllen, ähnlich dem oben beschriebenen Schlitten. Als Schlitten diente dazu ein Torfspaten, der etwas breiter als die Form selbst war und damit diesem Zweck gerecht werden konnte. Für den Gussvorgang selbst waren drei Personen von Nöten: eine, die den Schlitten zog, und zwei weitere, die den 40 kg schweren Topf entleerten. Auf Grund des engen Zeitfensters, in dem das Blei die nötige Fluidität aufweist, und einiger Kommunikationsfehler zwischen den Gießern und demjenigen, der den Schlitten zog,³⁴ kam kein konstanter Fluss zustande. Die Platte wies Unregelmäßigkeiten bezüglich ihrer Stärke auf und hatte einige Löcher. Die Flickversuche führten nur dazu, dass die Platte an Integrität verlor und leichte Risse aufwies, als man versuchte sie zu formen.

Da die verbleibende Zeit keinen dritten Versuch mehr zuließ, haben wir uns dazu entschieden, mit der vorhandenen Platte ein Rohr zu formen, um auch über diesen Arbeitsschritt Aussagen machen zu können und das Experiment zum Abschluss zu bringen. Es wurden erneut drei Personen benötigt, um die Platte zu tragen, da sie sonst abgeknickt

³⁴ Das Problem lag an der unterschiedlichen Auffassung des benötigten Einlaufwinkels und damit verbundenen Korrekturen während des Gussvorgangs. Der Grund dafür ist wohl in der unterschiedlichen Position und Perspektive der Beteiligten zu finden.

wäre. Als wir sahen, wie leicht sie sich bereits unter ihrem eigenen Gewicht verformte, stimmte uns das zuversichtlich bezüglich der Formgebung. Ohnehin erwarteten wir wenig Gegenwehr des Materials.

Doch erneut folgte Ernüchterung. Geblendet von den Aussagen der Literatur, dass Blei leicht formbar wäre, schwand unser Tatendrang rasch unter dem Umstand, dass vor allem die Schwankungen in der Dicke (die kaum mehr als 1,5 mm betrug) das Biegen des Rohres zu einem Kraftakt werden ließen. Zwei Personen benötigten unter konstanten Hammerschlägen weit mehr als eine halbe Stunde, um die Platte um das Rundholz zu treiben. Davon abgesehen war das Ergebnis ein ziemlich verbeulter Zylinder (Abb. 8). Auch das Entfernen des Schaftes gestaltete sich deshalb schwierig, denn dieser verkantete im Rohr. Als Verschlusstechnik war die Überlappung angedacht, wie sie in Abb. 6 an zweiter Stelle zu sehen ist. Zum Schritt der Verlötung kam es auf Grund des Zeitdrucks nicht mehr, da der Schmelzvorgang zu lange gedauert hätte.



Abb. 8: Das fertige Bleirohr mit zentrierter Inschrift

Der durchgeführte Durchlauftest zeigte, dass das Rohr Wasser führen konnte, allerdings wäre es durch die Löcher und Risse wohl kaum als Druckleitung geeignet gewesen.

Fazit

Zusammenfassend kann man festhalten, dass sich ein Laie einer schwer zu bewältigenden Aufgabe gegenüberstellt. Es kann daher darauf geschlossen werden, dass es unumgänglich war, spezialisierte Betriebe damit zu betrauen, denn ausnahmslos jeder Arbeitsschritt ist mit weit mehr Übung, Kraftanstrengung und Know-How verbunden, als es sowohl die Quellen wie auch die Literatur suggerieren. Zum Potential der Massenproduktion lässt sich festhalten, dass der benötigte Grad an Spezialisierung des ausführenden Personals ungleich höher ist als es zum Beispiel für die Herstellung einer Deichelleitung³⁵ der Fall ist. Hinzu kommt, dass eine entsprechend ausgestattete Werkstatt

³⁵ Siehe dazu den Beitrag in diesem Band.

unabdingbar ist. Sind diese Rahmenbedingungen gegeben, stellt der Typus der Bleileitung wohl denjenigen dar, der am ehesten einen zuverlässigen und schnellen Ausstoß neuer Leitungen garantieren kann.

Auch wenn beide Versuche und damit das Experiment nicht zum gewünschten Ergebnis führten, konnten einige Erkenntnisse gewonnen werden, insbesondere, dass die Herstellung weit komplizierter ist, als anzunehmen war. Interessant für ein zukünftiges Experiment wäre zum einen ein Drucktest, um zu sehen, wie stark ein solches Rohr tatsächlich belastbar ist. Dafür ist selbstverständlich ein funktionsfähiges Rohr von Nöten. Darüber hinaus wäre es wünschenswert zu erkunden, wie sich die Konnektivität mehrerer Versatzstücke verhält.

Abschließend bleibt nur zu sagen, dass Plinius mit dem von uns gefertigten Bleirohr keinen Springbrunnen hätte betreiben, wohl aber seinen Rasen sprengen können.

Quellenausgaben

- LUCIUS IUNIUS MODERATUS COLUMELLA, Über Landwirtschaft, übers., eing. und erl. von K. Ahrens (2. Aufl. Berlin 1976).
- SEXTUS IULIUS FRONTINUS, Wasser für Rom. Die Wasserversorgung durch Aquädukte, erl. und übers. von M. Hainzmann (München/Zürich 1979).
- PUBLIUS OVIDIUS NASO, Ibis. Fragmente. Ovidiana, hg., übers. und erl. von B. W. Häuptli (Zürich/Düsseldorf 1996).
- CAIUS PLINIUS SECUNDUS D. Ä., Naturkunde, 37 Bde., hg. und übers. von R. König/G. Winkler (Zürich u. a. 1990–2004).
- CAIUS PLINIUS CAECILIUS SECUNDUS D. J., Briefe in einem Band, übers. von W. Krenkel. Bibliothek der Antike. Römische Reihe (Berlin/Weimar 1984).
- MARCUS VITRUVIUS POLLIO, Zehn Bücher über Architektur, hg., übers. und mit Anmerkungen versehen von C. Fensterbusch (Darmstadt 1964).

Literatur

- | | |
|------------------|---|
| Blümmer 1897: | H. BLÜMMER, Blei. RE 3 (1897) 561-564 |
| Brekle 2010: | H.E. BREKLE, Herstellungstechniken von Inschriften auf römischen Wasserleitungsrohren aus Blei, in: G. Fanselow/T. Hanneforth (Hg.), Language and Logos. Studies in Theoretical and Computational Linguistics. Festschrift for Peter Staudacher on his 70th Birthday. Studia Grammatica 72 (Berlin 2010) 419-437. |
| Bruun 1991: | C. BRUUN, The Water Supply of Ancient Rome. A Study of Roman Imperial Administration, in: Commentationes Humanarum Litterarum 93 (1991) 20-130. |
| Cech 2011: | B. CECH, Technik in der Antike (2. Aufl. Darmstadt 2011). |
| Ellerhorst 1986: | W. ELLERHORST, Handbuch der Orgelkunde 1 (Buren 1986). |
| Grewe 2014: | K. GREWE, Aquädukte: Wasser für Roms Städte. Der große Überblick - vom Römerkanal zum Aquäduktmarmor (Rheinbach 2014). |

- Hodge 2002: A.T. HODGE, Roman Aqueducts & Water Supply (2. Aufl. London 2002).
- Kobert 1909: R. KOBERT, Chronische Bleivergiftung im Klassischen Altertum, in: P. Diergart (Hg.), Beiträge aus der Geschichte der Chemie. Dem Gedächtnis von Georg W. A. Kahlbaum, weil. o. ö. Professor der physikal. Chemie an der Universität Basel, geb. 1853, gest. 1905 in Basel, gewidmet (Leipzig u.a. 1909) 103-119.
- Needleman 1985: D. NEEDLEMAN/L. NEEDLEMAN, Lead Poisoning and the Decline of the Roman Aristocracy, in: EchosCI 4,1 (1985) 63-94.
- Reichert 1995: P. REICHERT, Orgelbau. Kunst und Technik (Wilhelmshaven 1995).
- Schneider 1997: H. SCHNEIDER, Die Gaben des Prometheus. Technik im Antiken Mittelmeerraum zwischen 750 v. Chr und 55 n. Chr., in: D. Hägermann/H. Schneider, Landbau und Handwerk 750 v. Chr. bis 1000 n. Chr. Propyläen Technikgeschichte 1 (Neuausgabe Berlin 1997) 17-313.
- Schwerteck 1997: H. SCHWERTECK, Blei. DNP 2 (1997) 707-709.
- Tölle-Kastenbein 1990: R. TÖLLE-KASTENBEIN, Antike Wasserkultur (München 1990).

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: P. REICHERT, Orgelbau. Kunst und Technik (Wilhelmshaven 1995) 92.
- Abb. 2 und 6: A. T. HODGE, Roman Aqueducts & Water Supply (2. Aufl. London 2002) 309, 312.
- Abb. 3 und 4: H.E. BREKLE, Herstellungstechniken von Inschriften auf römischen Wasserleitungsrohren aus Blei, in: G. Fanselow/T. Hanneforth (Hg.), Language and Logos. Studies in Theoretical and Computational Linguistics. Festschrift for Peter Stau-

dacher on his 70th Birthday. *Studia grammatical* 72 (Berlin 2010) 421, 422.

Abb. 5, 7 und 8:

Eigene Bilder.

Die Entdeckung der Langsamkeit. Oder: Der Nachbau einer römischen Deichelleitung

Josephine Blei

Zur Quellenlage

Holzrohre als Bestandteile römischer Wasserleitungen werden in der Forschung zum antiken Wasserbau recht stiefmütterlich behandelt.¹ Viel spannender, da vermeintlich von einem höheren Grad der Technisierung zeugend, erscheinen auf den ersten Blick die vielen anderen Formen von Wasserleitungsrohren aus Beton, Ton und Metall - oder aus einem Verbund dieser Materialien. Doch sind freilich diese Materialien wegen ihrer Beständigkeit ungleich besser erhalten und bilden das wesentliche archäologische Fundaufkommen, während Holzrohre und ihre Bestandteile selten, und noch viel seltener vollständig, aufgefunden werden. Jedoch schweigen sich auch die literarischen Quellen über Wasserleitungen aus Holz weitgehend aus. Man würde vielleicht erwarten, in den Ausführungen eines Frontinus oder Vitruvius, vielleicht auch in der Naturkunde des Plinius hierzu etwas zu finden; doch ganz offenbar scheint auch den antiken Zeitgenossen der Wasserleitungsbau mit Holzrohren nicht unbedingt der Erwähnung wert gewesen zu sein. Dies ist vielleicht mit der Verbreitung der Nutzung von Holzleitungen in Verbindung zu bringen. Betrachtet man einige Faktoren, die bei jedem größeren Bauvorhaben in der Antike Einfluss nahmen, lässt sich dieses Fehlen vielleicht erklären. Zunächst spielt das günstige Vorkommen von Ressourcen, von Baustoffen eine wichtige Rolle. Nur da, wo genügend Bauholz vorhanden ist, lohnt es sich auch, auf diesen Rohstoff für den Wasserbau zurückzugreifen. Dicht bewaldete, holzreiche Gebiete - und, dadurch bedingt, auch eine eher dünne Besiedlung - schaffen die notwendige Voraussetzung. Für Italien und den Großteil des Mittelmeerraumes trifft diese Voraussetzung spätestens ab dem 2. Jh. v. Chr. nicht mehr zu,² wohl aber für den nordalpinen Raum, der in

¹ Kurze Erwähnungen in WIKANDER 2000, 62; CECH 2011, 128; GREWE 2014, 80; GREWE 1985, 57 und 59; gar nicht erwähnt in: DÖRING 2016; FRONTINUS-GESELLSCHAFT 2013; SCHNEIDER 1997; SCHNEIDER 2010.

² Dies heißt nicht, dass die in der älteren Forschung oftmals postulierte Entwaldung bzw. Verkarstung zutreffend ist: Tatsächlich ist eine dauerhafte Entwaldung gar nicht festzustellen, vgl. NENNINGER 2001, 198-202; ABSMEIER 2015, 20f. Vielmehr bringt die gestiegene Besiedlungsdichte einen erhöhten Bedarf an Holz, vor allem für landwirtschaftliche Zwecke und als Brennstoff für das Töpfer- und Metallhandwerk mit sich. Die für das republikanische und kaiserzeitliche Italien als Kulturland anzusprechenden Wälder dienten also wohl eher vorrangig diesen Bedürfnissen und konnten nicht mit dem Holzreichtum der nordalpinen Gebiete mithalten.

der Römischen Kaiserzeit im Zuge der Eroberungen und Erkundungen für seinen Holzreichtum geradezu berühmt wurde.³ Und so finden sich auch die spärlichen Reste hölzerner Wasserleitungen vornehmlich in den Rhein- und Donauprovinzen.⁴ Zwar haben sowohl Frontinus als auch Plinius sich im Rahmen ihrer senatorischen Laufbahn in den germanischen Provinzen aufgehalten; dennoch ist es nicht weiter verwunderlich, dass in ihren Werken (fast) keine Holzrohre auftauchen. Möglicherweise spielten sie in der Kaiserzeit im stark urbanisierten Kerngebiet der römischen Herrschaft einfach keine wesentliche Rolle mehr und gehörten nicht mehr zum technischen „State of the Art“. Plinius stellt lediglich in seinen Ausführungen zur Arborikultur, speziell im Kapitel zu den Bauhölzern, fest:

„Die Pinie, die Kiefern und die Erlen werden zur Verwendung als Wasserleitungsröhren ausgehöhlt; mit Erde bedeckt, halten sie sehr viele Jahre; falls sie aber nicht zugedeckt werden, altern sie schnell, sind aber seltsamerweise viel beständiger, wenn sie auch außen Feuchtigkeit haben.“⁵

Auch wenn es ihm nicht erklärlich war, diagnostiziert Plinius das wesentliche Problem, dass sich auch heute der archäologischen Forschung stellt: Ohne humide Bedingungen ist Holz relativ schnell dem Verfall ausgesetzt. Dennoch kommt, in Ermangelung weiterer schriftlicher Nachrichten, dem spärlichen archäologischen Befund eine erhöhte Bedeutung zu. Dass vor allem die innerörtliche Wasserversorgung ganz unterschiedlicher Siedlungskontexte in den Nordprovinzen durch Holzrohre, sogenannte Deichelleitungen, gewährleistet wurde, zeigen die Funde von eisernen Deichelringen (Abb. 1), zum Beispiel im nachflavischen Steinkastell von *Aquae Mattiacorum* (Wiesbaden), in größeren Zivilsiedlungen wie *Aventicum* (Avenches, CH) und *Augusta Raurica* (Augst, CH),⁶ und in landwirtschaftlichen Betrieben, etwa in den Villenanlagen von Hechingen-Stein und Heitersheim.⁷ Meist sind Deichelringe die einzigen Bestandteile der Holzleitungen,

³ Vgl. zusammenfassend NENNINGER 2001, 87-110; Tac. germ. 5 betont den „schaurigen Eindruck“, den Germanien mit seinen Wäldern und Sümpfen macht; vom „Wunder der Wälder“ (*silvis miraculum*) in den nördlichen Gegenden und der ungeheuren Größe der Eichen im Hercynischen Wald berichtet Plin. nat. hist. 16,2,5f.

⁴ Vgl. etwa CECH 2011, 128; WIKANDER 2000, 62; GREWE 1988; OBMANN 2001.

⁵ Plin. nat. hist. 16,81.

⁶ Vgl. GREWE 1988, 60, 66, 70; im Falle von Augst konnte neben den Deichelringen außerdem der in der Holzleitung abgelagerte Kalksinter mit einem Außendurchmesser von 12 cm geborgen werden.

⁷ Vgl. FILGIS 2005 192f.

die sich bis heute im Fundmaterial erhalten haben. Diese relativ dünnwandigen Eisenzy-
linder dienten als eine Manschette oder Muffe, als Verbindungsstück zwischen zwei
Rohren. Eine in der Mitte umlaufende wulstartige Verdickung sorgte dafür, dass der Ei-
senring in beide Stämme gleich tief eindrang, also optimale Stabilität der Verbindung
gewährte.⁸ Die Funde von Deichelringen erlauben außerdem, den relativen Durchmes-
ser der hölzernen Leitungsrohre nachzuvollziehen; schwerer nachzuprüfen ist, ob die
von Frontinus für die stadtrömischen Leitungen angegebenen Normierungen (Kaliber)
auch sonst im Imperium Romanum berücksichtigt worden sind.⁹



Abb. 1: Deichelbohrer, eiserne Deichelringe, Reste römischer Wasserleitungen und Modell eines Deichels im Saalburgmu-
seum

⁸ Vgl. GREWE 1988, 63.

⁹ Vgl. Frontin. aqu. 24-63; negativ dazu TÖLLE-KASTENBEIN 1990, 84, doch sollte der Hinweis des Frontinus nicht ganz außer Acht gelassen werden: „Insgesamt gibt es 25 Kaliber. Mit Ausnahme jener vier, welche die Leitungstechniker verändert haben, stimmen sie alle sowohl mit dem System als auch mit den Angaben in den kaiserlichen Protokollen überein; doch müssen alle Einzelheiten - soweit sie die Messung betreffen - gesichert sein und unveränderlich miteinander in Einklang stehen: denn nur so wird auch das System in seiner Gesamtheit fehlerlos bleiben.“ (Frontin. aqu. 34).

Und so dürften Durchmesser, Querschnitt und Wandungsstärke der Holzdeichel recht unterschiedlich ausgefallen sein. Dies bestätigen auch die eher seltenen Funde durchbohrter Stämme. Während etwa die Holzrohre der Wasserleitung ins römische Aachen eine Aufbohrung von 11 cm Durchmesser aufweisen, liegt dieser bei den im heiligen Bezirk von *Cambodunum* (Kempten im Allgäu) gefundenen Holzrohren nur bei 6 bis 7 cm.¹⁰ Wie der Durchmesser variiert auch die Länge der einzelnen Rohre, die bis zu 4,50 m betragen konnte.¹¹

Anders als bei Plinius beschrieben, überwiegt im Fundmaterial der Rohstoff Eiche. Sofern feststellbar und in der Literatur angegeben, wurde in den nördlichen Provinzen vornehmlich auf diese Holzart zurückgegriffen.¹² Allerdings gründet sich diese Annahme darauf, dass eben bei den Funden von Holzwasserleitungen Eichenrohre überwiegen. Dies dürfte aber vor allem darauf zurückzuführen sein, dass Eiche sehr viel haltbarer als andere Holzarten ist, die vielleicht gerade deswegen nicht im Fundgut auftauchen. Im Hinblick auf die Haltbarkeit der Leitungen, die Plinius ausdrücklich anspricht, bietet sich Eiche als Baustoff nur an: Unter Wasser oder in feuchter Umgebung ist diese Holzart die dauerhafteste.¹³ Tatsächlich bietet Eiche aber noch einen weiteren Vorteil. Das harte Holz eignet sich hervorragend zum Bohren von langen Röhren, allerdings nur im fälltfrischen, feuchten Zustand; E. Hollstein, vielleicht auch gestützt auf empirische Daten heutiger Handwerker,¹⁴ stellt die Vorteile wie folgt dar:

„Um Trockenrisse schon bei der Herstellung zu vermeiden, mußten die Deicheln im Feuchtzustand des Holzes gebohrt und verlegt werden, in der Regel also unmittelbar nach der Fällung der verwendeten Bäume. Aus den Herstellungsbedingungen erklärt sich auch die Vorliebe für Eichenholz. Eichenholz ist (unter Wasser oder im Wasserbereich) nicht nur das dauerhafteste, sondern auch das zum Bohren am besten geeignete Material. Bei Weichhölzern kommt es öfter zum Verklemmen des Bohrers, wenn die Späne

¹⁰ Angaben nach GREWE 1988, 62 und 70; Maßangaben zu weiteren Deichelfunden auch bei HOLLSTEIN 1974, 102f.

¹¹ So bei einem Teilstück der Leitungen im heutigen Stadtgebiet von Aachen, vgl. GREWE 1988, 62; WIKANDER 2000, 62 spricht sogar von Längen bis 7,50 m.

¹² Vgl. allgemein WIKANDER 2000, 62; vgl. auch hierzu wieder die Aachener Holzleitung aus Eichenrohren: GREWE 1988, 62.

¹³ Vgl. HOLLSTEIN 1974, 101.

¹⁴ HOLLSTEIN 1974, 103 erwähnt hier - an anderer Stelle - den Hinweis eines alten Handwerksmeisters.

fasern und nicht richtig ausgeworfen werden. Eichenholz lässt sich jedoch im frischen Zustand vorzüglich bohren, gerade wegen seiner größeren Härte. Der Spanauswurf - sicher ein Hauptproblem beim Deicheln - ist wesentlich günstiger.“¹⁵

Der Bohrvorgang scheint also keine reine Banalität zu sein - vielmehr kommt es auf die Auswahl des richtigen Materials, dessen Beschaffung und Lagerung¹⁶ sowie außerdem auf das Werkzeug und die richtige Technik an. Wie kommt also das Loch ins Holz? Welcher technische Aufwand war nötig, um solche Bohrungen herzustellen? Noch bis zur Industrialisierung waren Holzrohre als Wasserleitungen in Mitteleuropa allgemein gebräuchlich.¹⁷ Sie weisen im Grunde keine Unterschiede zu römischen Deicheln auf, was eine ähnliche Herstellungsverfahren vermuten lässt.¹⁸ Und wirklich gibt es im römischen Fundmaterial ein Werkzeug, das mit den langen Deichelbohrern frühneuzeitlicher und moderner Deichelbauer vergleichbar und mit Sicherheit deren Vorläufer ist.¹⁹ Der sogenannte Löffelbohrer - wohl *terebra gallica*²⁰ -, dessen Spitze tatsächlich aus einer Art Löffel mit scharfen Schneiden besteht, schält in axialer Richtung das Holz aus dem Stamm, so dass eine kreisrunde Bohrung entsteht. Eine Art römisches Standard-Werkzeug²¹, waren die speziellen Löffelbohrer zum Wasserleitungsbau mit einem langen Ei-

¹⁵ HOLLSTEIN 1974, 101.

¹⁶ In Bezug auf mittelalterliche und frühneuzeitliche Holzwasserleitungen verweist SCHNAPPAUFF 1980, 89 auf die Lagerung der Stämme und Rohre in besonderen Teichen, bis diese zur Verwendung kamen - offenbar sollte das Austrocknen und die Entstehung von Trockenrissen vermieden werden.

¹⁷ So war vermutlich gar die römerzeitliche Aachener Wasserleitung bis in diese Zeit in Betrieb und ist in der Zwischenzeit immer wieder ausgebessert worden, worauf eine spätmittelalterliche Inschrift auf einem Deichel hinweist, vgl. GREWE 1988, 62.

¹⁸ Vgl. HOLLSTEIN 1974, 102; siehe auch SCHNAPPAUFF 1980 und LAMBERTH 1980.

¹⁹ Meist noch in alten Handwerksbeständen zu finden, entsprechen diese sogenannten Stock- oder Löffelbohrer dem römischen Vorbild, vgl. etwa Abbildungen von Löffelbohrern des 18. und 19. Jahrhunderts in DUES 1988, 153, 182, 283f. und 320, hier in unterschiedlichen Ausführungen für verschiedene Gewerbebranchen des Holzhandwerks. Zum Vergleich sei hier auf die filmische Dokumentation des Einsatzes eines „alten“ Deichelbohrers verwiesen: https://www.youtube.com/watch?v=ICgU_-wKUU.

²⁰ Plin. nat. hist. 17,116 und Colum. 4,29,15-17; PIETSCH 1983, 42 deutet die Stellen dahingehend, dass hier der Löffelbohrer für den vertikalen Gebrauch gemeint ist (siehe unten Anm. 25); so auch GAITZSCH 1980, 19-24 mit Verweisen auf weitere Erwähnungen etwa bei Celsus und Vitruvius.

²¹ Vgl. etwa MUTZ 1980, 128 mit Abb. 3,13; MANNING 1985, 26f. mit Verweis auf weitere Funde/Literatur; siehe außerdem verschiedene Ausführungen von Löffelbohrern hier, Kat.-Nr. B55-57, Plate 12; GAITZSCH 1980, Kat.-Nr. 185. 186, 229-232, 275-277, Taf. 39, 47, 51, 55, 56; HARNECKER 1997, Kat.-Nr. 80-97, Taf. 11 und 12; PIETSCH 1983, Kat.-Nr. 326-335, Taf. 14; siehe auch zuletzt ABSMEIER 2015, 102-106.

senschaft versehen, der es ermöglichte, entsprechend lange Röhren zu bohren.²² Die Form bedingt die besondere Wirkungsweise des Löffelbohrers. Durch die Bohrmulde des Löffels entsteht vorn eine Spitze, während auch an beiden Seiten scharfe, innen angeschliffene Schneiden vorhanden sind. Bei den meisten Exemplaren parallel verlaufend, runden sich die Seitenkanten bei einigen Funden auch gleichmäßig nach außen - bilden also tatsächlich die Form eines Löffels.²³ Der Abstand der seitlichen Schneiden bedingt den Bohrradius.²⁴ Die Spitze, die zuerst in das Holz eindringt, zentriert sich gleichsam von selbst; sie ist es auch, die den Großteil der Bohrarbeit erledigt. Ist der Löffel bis zu seiner breitesten Stelle eingedrungen und damit die Führung im entstehenden Loch gegeben, gleichen die Schneiden hauptsächlich Unebenheiten aus und halten den Bohrkopf in der Führung. So zumindest sollte der Bohrer nicht verklemmen und auf seiner ganzen Länge eine gerade Bohrung erzeugen.²⁵ Zwei verschiedene Ausführungen des Löffelbohrers tauchen im Fundmaterial auf: Frühe Löffelbohrer zeigen einen kontinuierlichen Übergang vom Schaft zur gewölbten Schneide, während jüngere Exemplare meist abgesetzte und angeschmiedete Löffel aufweisen.²⁶ Am anderen Ende des Schaftes ist jeweils eine flache, viereckige bis rautenförmige Griffplatte oder Angel angeschmiedet, an der wiederum ein Querholz angebracht wurde, um das nötige Drehmoment zu erzeugen.²⁷

Der Fund dreier solcher Löffelbohrer unterschiedlicher Größe aus dem Vicus von Schwarzenacker²⁸ (Abb. 2) mit einer Länge von 150 cm legt nahe, dass das Bohren des Deichsels in mehreren Schritten vor sich gegangen sein muss. Vermutlich wurden die Bohrer nacheinander eingesetzt, wodurch die Bohrung stetig vergrößert wurde. Da der Vorgang nicht frei Hand stattfinden konnte, ist ein Aufbau ähnlich einer Werkbank zu vermuten. Das zu bohrende Stück Holz musste fixiert werden, sicher ist auch eine Auflageeinrichtung für den Bohrer anzunehmen, der ja eine beträchtliche Länge aufweist

²² Siehe z.B. einen Löffelbohrer von 127,5 cm Länge im Saalburg-Museum (Abb. 1): PIETSCH 1983, Kat.-Nr. 326, Taf. 14.

²³ Vgl. GAITZSCH 1980, 29.

²⁴ Vgl. GAITZSCH 1980, 29.

²⁵ Vgl. PIETSCH 1983, 42f.; MUTZ 1980, 126-128.

²⁶ Vgl. HARNECKER 1997, 8f; die Exemplare aus Haltern gehören allesamt zum ersten Typ. PIETSCH 1983, 42-44 unterscheidet zwischen Löffelbohrern für eine horizontale Schäftung (Typ A) und für eine vertikale Schäftung (Typ B).

²⁷ Vgl. GAITZSCH 1980, 29; PIETSCH 1983, 42.

²⁸ Vgl. HOLLSTEIN 1974, 101 mit Anm. 2.

und erst allmählich in das Holz eindringt und dort ein Widerlager findet. Leider sind unter den zahlreichen Berufs- und Handwerksdarstellungen, die sich vornehmlich auf römischen Grabreliefs finden, keine Abbildungen zu finden, die mehr Licht auf den Herstellungsprozess einer Deichelleitung werfen könnten.²⁹



Abb. 2: Fragmente römischer Löffelbohrer im Römermuseum Schwarzenacker

Fragestellung, Versuchsaufbau und Akteure

Wie kommt das Loch ins Holz? - Diese Frage wurde bereits formuliert und stellte im wesentlichen auch die Ausgangsfrage des im Folgenden dokumentierten archäologischen Experiments dar. Bewusst offen gehalten, umfasst diese Leitfrage gleich mehrere Probleme, die im Experiment untersucht werden sollten:

- ✦ Wie stellen sich Funktion und Funktionalität der Deichelbohrer dar?
- ✦ Gibt es Probleme bei der Bohrung eines Stammes von zwei Seiten?

²⁹ Vgl. ZIMMER 1982, 139-143, Kat.-Nr. 56-61; hier lediglich zwei Darstellungen von Drillbohrern: Kat.-Nr. 61 und 128; siehe zu den bildlichen Darstellungen von Bohrern GAITZSCH 1980, 24f., Taf. 42, 197.

- ✦ Mit welchem relativen Zeitaufwand ist für die Herstellung eines Wasserrohres zu rechnen?
- ✦ Welche Anforderungen an technisches Know-How bzw. handwerkliches Geschick stellt der Vorgang des Deichelbohrens an die Beteiligten?

Außerdem sollte beobachtet werden, wie die Verbindung der Holzstämmen durch Deichelringe zu bewerten ist. Ist neben dem Kragen aus Eisenblech zudem eine Abdichtung, etwa durch Aufquellen des Holzes oder durch die Verwendung von Pech nötig?

Die vorab formulierten Fragen gehen auch auf die Denkanstöße der bisherigen Forschung zurück, vor allem auf die Ausführungen E. Hollsteins: Das Problem, dass der Bohrer verklemmt und Späne nicht richtig ausgeworfen werden, ist bereits angesprochen worden; geradezu als „Hauptproblem beim Deicheln“ bezeichnet Hollstein den Auswurf des anfallenden Abfalls.³⁰ W. Gaitzsch weist ausdrücklich darauf hin, dass „optimal nur so lange gebohrt werden kann, wie die Späne aus dem Bohrschacht treten können (...)“.³¹ Im Folgenden wirft Hollstein auch die Frage auf, wie mit einem Bohrer mit einer maximalen Länge von 150 cm ein bis zu 300 cm langes Rohr gebohrt werden konnte; freilich bezieht sich diese Frage auf die beschriebenen Funde aus Neunkirchen, Mittelstrimmig und Dillingen (Saarland), welche nur durchbohrte Teilstücke eines dicken, im Kernholz gespaltenen Eichenstammes sind. Sie wurden also nicht im Kernholz, in der sogenannten Markröhre gebohrt. Hollstein verweist auf die Aussage eines alten Handwerksmeisters, dass „ein guter Deichelbohrer von selbst in der Stammachse bleibt, wenn man in der Markröhre, dem Zentrum des Baumes, ansetzt.“³² - Diese Behauptung, so wahrscheinlich sie auch klingt, sollte dennoch überprüft werden.

Während der Versuchsaufbau zur Beantwortung dieser Fragen sowohl in der Planung als auch in der Durchführung keine großen Schwierigkeiten verursachte, gestaltete sich die Beschaffung des Arbeitsmaterials problematisch. Einen fällfrischen Eichenstamm mit dem richtigen Durchmesser oder auch nur ein geeignetes Segment eines fällfrischen Stammes aufzutreiben, ist in der Welt des modernen „Trockenbaus“ wohl nahezu ein Ding der Unmöglichkeit. Moderne Betriebe und Holzhändler bedienen den Markt mit abgelagertem, auf normierte Größen zugeschnittenen Baustoffen. In den bayrischen

³⁰ Siehe oben.; vgl. auch ABSMEIER 2015, 102 und 105f.

³¹ GAITZSCH 1980, 32; allerdings bezieht sich GAITZSCH nur auf Bohrer kürzerer Längen zwischen 15 und 30 cm, Deichelbohrer oder Bohrer ähnlicher Länge sind in seinem Werk nicht aufgenommen.

³² HOLLSTEIN 1974, 103.

Staatsforsten im Augsburger Umland sowie dem Landschaftsschutzgebiet Westliche Wälder sind Eichen nur selten anzutreffen und gehören freilich zum zu erhaltenden und zu vermehrenden Baumbestand.³³ Nach intensiven Bemühungen und einigen Telefonaten gelang es schließlich, eine geeignete Lärche aus dem städtischen Forstrevier Diedorf westlich von Augsburg zu bekommen. Der zuständige Förster, Herr Siegfried Knittel, stellte den Baum für das Experiment zur Verfügung und sägte den Stamm auch gleich in passende Stücke von 2 m Länge. So war wenigstens die wichtige Bedingung der frischen Fällung erfüllt. Aufgrund verständlicher anderer Verpflichtungen des Försters lagen die Stämme allerdings fast zwei Wochen an Ort und Stelle, bis sie abgeholt werden konnten und das eigentliche Experiment am 11. Juli 2015 begann. Als ganz fälltfrisch wird man das Holz daher nicht bezeichnen dürfen, zumal die andauernde Hitze und Trockenheit des Sommers ihr Übriges zur Austrocknung beitrug. Außerdem fanden die Experimente jeweils an vier aufeinanderfolgenden Wochenenden statt - einerseits, um Überschneidungen im studentischen Terminkalender zu vermeiden, andererseits, um ein möglichst breites Publikum im Kemptener APC zu erreichen. Während des laufenden Experiments lagen die Stämme also noch einmal vier Wochen - zwar nicht in der Sonne, aber auf dem Trockenen. Die örtlichen Einrichtungen des APC erlaubten leider keine Lagerung im Wasser.

Nach den Funden von Schwarzenacker stellte der Schmied Jürgen Graßler, der vor allem im Bereich historische Schmiedekunst tätig ist, drei Deichelbohrer her (Abb. 3). Dabei handelt es sich nicht um tatsächliche Rekonstruktionen, sondern lediglich Modelle im Maßstab 1:1. Für den Schaft und die Angel am hinteren Ende des Schaftes wurde handelsüblicher Stahl verwendet. Die Löffelköpfe aus Weicheisen, das dem vorindustriellen Stahl sehr nahe kommt, wurden einzeln gearbeitet und auf die Schäfte aufgesetzt. Durch diesen Kompromiss bleibt gewährleistet, dass die tatsächliche Funktionsweise der Bohrer, die im Wesentlichen in der Form des Bohrkopfes begründet liegt, nachvollziehbar ist. Bei der Herstellung der Bohrer wurde außerdem berücksichtigt, dass die Funde zur Zeit ihrer Benutzung einem gewissen Verschleiß ausgesetzt und außerdem stark korrodiert waren. Die Abnutzung des Löffels, insbesondere der Spitze und der Seitenkanten, wurde bei der Anfertigung der Modelle einberechnet.

³³ Vgl. FALT/L/RIEGERT 2014.



Abb. 3: Nachgebaute Deichelbohrer

Auf den Angeln der Bohrer wurde jeweils ein Querholz aus Hartholz aufgesetzt, das zuvor mit einer passenden Nut versehen worden war. Die trianguläre Form der Angeln macht eine aufwendige Befestigung des Querholzes überflüssig, zumal der Druck in Richtung des Bohrkopfes erfolgt. Lediglich durch die starke Beanspruchung im Experiment durch das Herausziehen des Bohrers, bei dem das Querholz immer wieder von der Angel rutschte, wurde es später nötig, die Querhölzer zusätzlich durch Lederriemen zu befestigen.

Der Aufbau für den eigentlichen Bohrvorgang ist denkbar einfach (Abb. 4). Der zu bohrende Stamm wurde auf eine Platte gelegt, die durch zwei Böcke auf eine geeignete Arbeitshöhe gebracht wurde, und durch Ketten fixiert. Für den Bohrer wurde durch einen weiteren Bock eine Führung auf gleicher Höhe eingerichtet. Stets musste darauf geachtet werden, dass sich sowohl Stamm als auch Bohrer horizontal wie vertikal „im Wasser“ befanden, so dass der Bohrer auch tatsächlich gerade und gleichmäßig in den Stamm eindrang. Ein Seil und eine Wasserwaage waren daher ständiger Begleiter bei der Justierung dieses Aufbaus, die nach jedem Bohrvorgang vorgenommen wurde.

In die praktische Ausführung des Experiments waren alle Teilnehmer des Projekts gleichermaßen einbezogen, soll heißen: Gleich, welches Teilprojekt jeder einzelne verfolgte, beteiligten sich alle Studierenden an der körperlich recht anstrengenden Bohrarbeit und verfolgten gespannt die Fortschritte. Tatkräftige Unterstützung und großes Interesse kam auch von den Besuchern des APC, von denen sich einige mit großer Begeisterung der Bohrarbeit widmeten. Die eigentliche Vorbereitung, Leitung und Durchführung des Experiments hatten die Studierenden Julia Ahlert, Johannes Mair und Lavinia Meyl übernommen, konnten aus beruflichen und familiären Gründen jedoch nicht mehr am

gesamten praktischen Versuch teilnehmen, weshalb hier die Autorin eingesprungen ist. Obwohl es also zu einem „Personalwechsel“ gekommen ist, sollen doch die lobenswerten und arbeitsintensiven Vorarbeiten der Projektgruppe zu den Fragestellungen und zum Aufbau des Experiments ausdrücklich erwähnt werden.



Abb. 4: Bohraufbau

Versuchsablauf und Dokumentation

Vor dem praktischen Experiment wurde das Vorgehen zur Dokumentation der laufenden Arbeiten und der Ergebnisse festgelegt. Jeweils 12,5, 25 bzw. 50 Drehungen³⁴ mit dem Querholz folgte das Herausnehmen des Bohrers, die Messung der Bohrtiefe und die erneute Justierung des Bohrers. Da sich die Beteiligten mit dem Bohren abwechselten, kam es hierbei freilich zu teilweise recht großen Unterschieden, je nach Physis und individueller Technik des Einzelnen. Was vor dem Bohren noch nicht in diesem Ausmaß absehbar war, sich aber schnell herausstellte, war die Notwendigkeit, nach jedem

³⁴ Während mit dem kleinen Bohrer noch 50 Drehungen möglich waren, musste man mit dem mittleren und großen Bohrer auf 25 bzw. 12,5 Drehungen reduzieren, da hier einfach aufgrund der Größe der Bohrer zu viele Späne anfielen, die regelmäßig aus dem Stamm entfernt wurden.

Durchgang den Spanabfall aus dem Stamm zu entfernen. Dies gestaltete sich umso langwieriger, je tiefer das Bohrloch wurde, und war außerdem abhängig von der Kraft, die auf den Bohrer eingewirkt hatte. Je stärker der Bohrer beim Drehen in das Holz gedrückt wurde, desto größer wurde zwar die Bohrtiefe, aber umso schneller verklebten und verstopften die Späne. So war schnell klar: Viel, vor allem viel Gewalt, hilft nicht viel, wollte man sich nicht mit einem verklemmten Bohrer oder verstopften Bohrloch abmühen.

Hier entwickelte der kleinste Löffelbohrer einen zweiten Verwendungszweck; tatsächlich eignete sich der kleine Löffel sehr gut dazu, die im Stamm hängengebliebenen und verstopften Späne herauszuholen - eine Arbeit, die letztlich mehr Zeit als das eigentliche Bohren beanspruchte und den Fortschritt deutlich verlangsamte. Da hierdurch eine deutliche Verzögerung des geplanten Vorankommens abzusehen war, wurde der Stamm von 200 auf 150 cm verkürzt.

Insgesamt dauerte das Durchbohren des ersten Stammes mit allen drei Bohrern etwa 22 Stunden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Arbeiten am Deichel immer wieder unterbrochen wurden, um die Besucher des APC über das Experiment aufzuklären oder daran mitwirken zu lassen, oder um der lokalen Presse Rede und Antwort zu stehen. Ohne diese willkommene Abwechslung wird man die tatsächliche Bohrzeit wohl wesentlich kürzer ansetzen dürfen.

Zuerst wurde einer der Lärchenstämme mit dem kleinen Bohrer (L/B 5/2 cm) im Kernholz angebohrt (Abb. 5). Hier wurde zunächst mit einem Intervall von 25 Drehungen begonnen, nach 16 Durchgängen wurde auf ein Intervall von 50 Drehungen umgestellt. Es war schlichtweg nicht nötig, den kleinen Bohrer so oft wieder aus dem Stamm zu ziehen, da hier noch relativ wenig Spanabfall anfiel und so die Arbeit ohne Probleme beschleunigt werden konnte. Die Bohrarbeiten gingen zwar langsam, aber stetig voran. Zu beobachten war vor allem, dass die zunehmende Austrocknung des Holzes das Bohren erschwerte. So war besonders die zweiwöchige Unterbrechung zwischen erstem und zweitem Bohrtag als Ursache für das zähe Vorankommen am Beginn des zweiten Bohrtages festzumachen. Sobald man aber mit zunehmender Bohrtiefe wieder in feuchteres, noch nicht so stark angetrocknetes Kernholz eindrang, pendelte sich die alte Bohrgeschwindigkeit wieder ein.



Abb. 5: Bohren mit dem kleinen Bohrer

Nachdem eine Bohrtiefe von gut 110 cm erreicht war, wurde der Stamm umgedreht. Freilich hätte man mit dem 150 cm langen Bohrer auch einfach durch den gesamten Stamm von einer Seite bohren können; doch geht der Bohrvorgang schneller von stat-ten, je kleiner die Bohrtiefe ist. Dies liegt nicht am Bohrer, sondern daran, dass die Holzspäne so viel leichter und schneller aus dem Stamm entfernt werden können. Da von beiden Seiten im Kernholz gebohrt wurde, war zu erwarten, dass sich die Röhren von beiden Seiten treffen würden - und so war es auch. Dank des immer wieder exakt ausgerichteten Aufbaus entstand eine gerade und gleichmäßige Röhre, durch die man den Bohrer leicht von einem Ende zum andren durchschieben konnte (Abb. 6). Ob man den Bohrer rechts- oder linksherum drehte, schien keinen Effekt auf die Bohrtiefe zu haben. Als hilfreich stellte sich heraus, den Bohrer zwischendurch in verschiedene Rich-tungen ohne Krafteinwirkung leer drehen zu lassen, um festgeklebte und verstopfte Späne zu lösen.

Nachdem die erste Bohrung mit dem kleinen Bohrer fertig war, schritten die Bohrungen mit dem mittleren (L/B 7/4 cm) und großen Bohrer (L/B 8/5 cm) signifikant schneller voran. Dies lag freilich daran, dass bereits eine gerade Bohrung vorhanden war und größere Späne abgeschält wurden. Man darf aber vielleicht auch nicht vernachlässigen, dass die zunehmende Übung und Routine der Bohrenden die Arbeiten etwas beschleunigten. Aufgrund des nun größeren Spanabfalls wurde in Intervallen von 25 Drehungen gebohrt, beim großen Bohrer war es sogar nötig, bereits nach 12,5 Drehungen den Stamm auszuräumen (Abb. 7 und 8). Zudem war hier der Kraftaufwand so hoch, dass eine Pause durchaus willkommen war. Während bei der Bohrung mit dem mittleren Bohrer der Stamm ebenfalls gedreht wurde, lief die Bohrung mit dem großen Bohrer so gut, dass von einer Seite komplett durchgebohrt wurde.

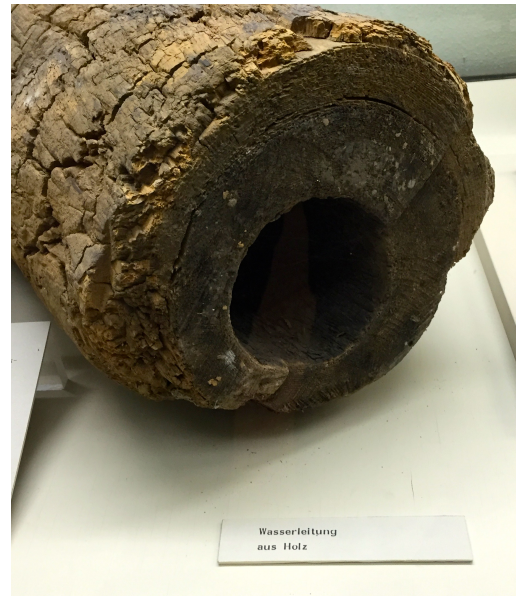
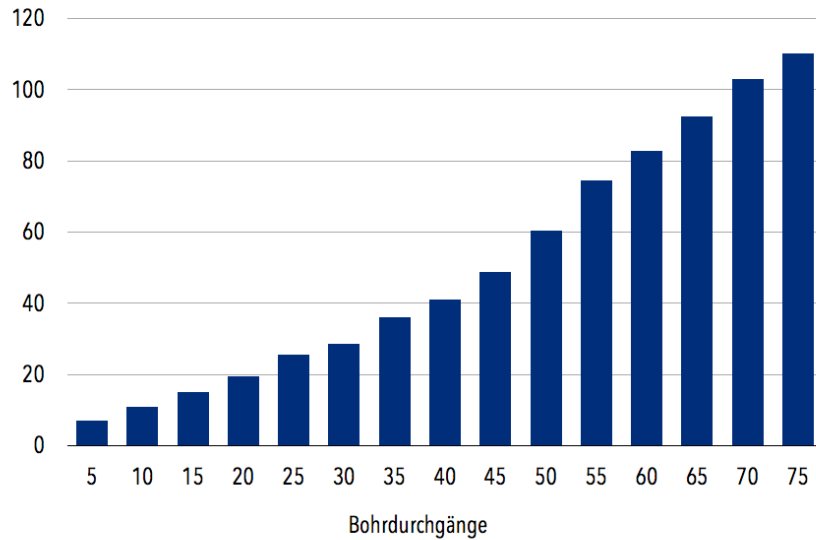


Abb. 6: Die fertige Röhre; zum Vergleich: Ein Deichel im Römermuseum Bedaiaum in Seebruck am Chiemsee

Neben den abgebildeten Graphiken sind die genauen Bohrmessungen tabellarisch im Anhang festgehalten. Hier sind auch einzelne zwangsläufige Abweichungen von der Bohrroutine gekennzeichnet, die keinen Eingang in die Graphiken gefunden haben.

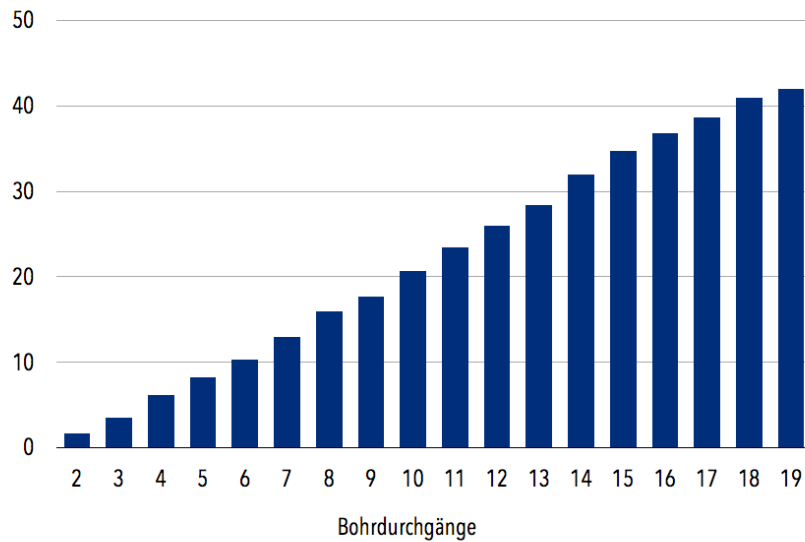
Erste Bohrung mit kleinem Bohrer

Bohrtiefe in cm



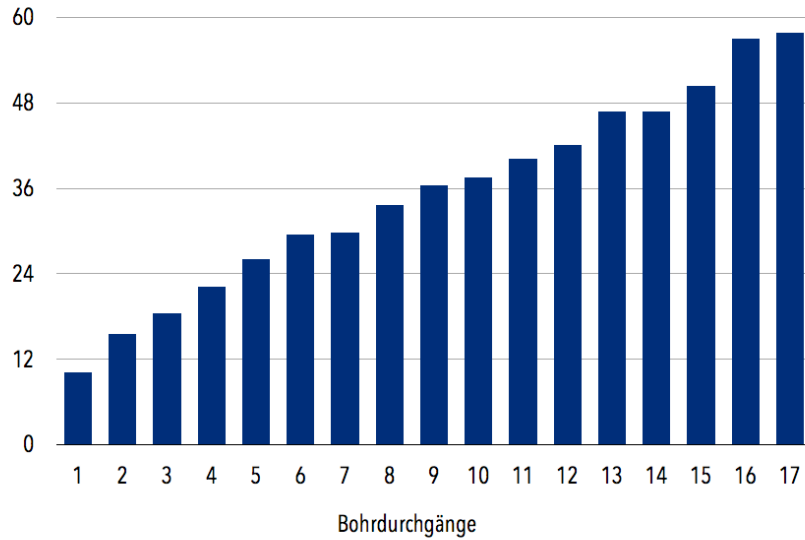
Zweite Bohrung mit kleinem Bohrer (von der anderen Stammseite)

Bohrtiefe in cm



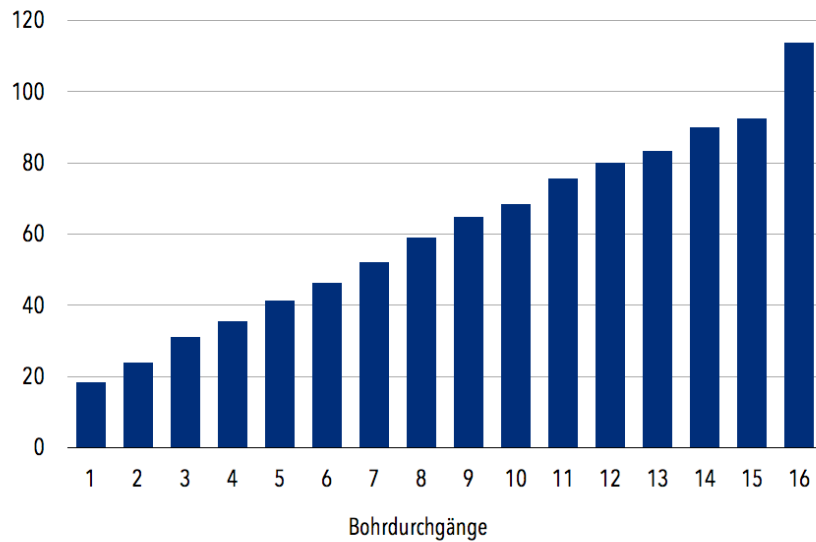
Erste Bohrung mit mittlerem Bohrer

Bohrtiefe in cm

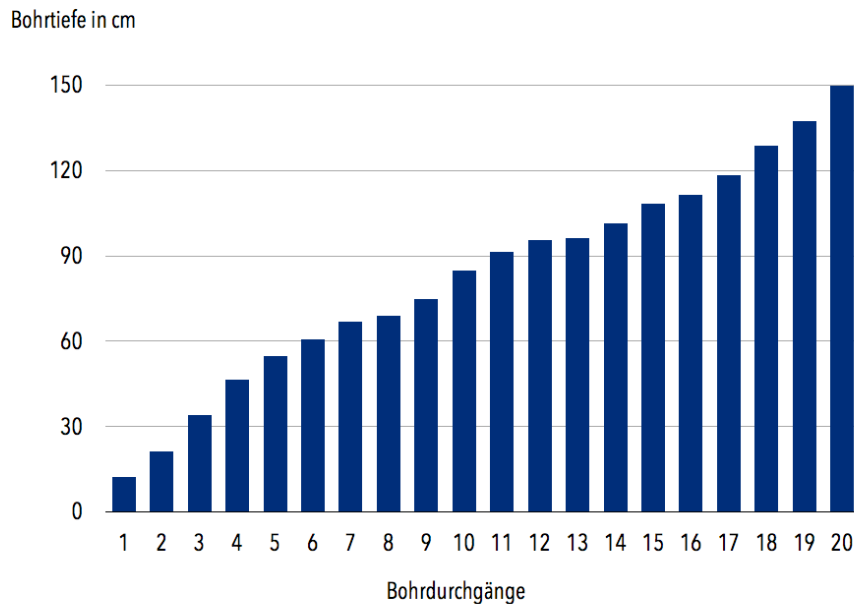


Zweite Bohrung mit mittlerem Bohrer (von der anderen Stammseite)

Bohrtiefe in cm



Bohrung mit großem Bohrer



Die Bohrung des zweiten, ebenfalls auf 150 cm verkürzten Stammes wurde aus Zeitgründen nicht mehr dokumentiert. Schließlich hieß es nun, das zweite Stück für die kurze Wasserleitung fertig zu bekommen. Mit einer elektrischen Bohrmaschine wurde der Stamm von beiden Seiten 40 cm angebohrt, danach kam sofort der mittlere Bohrer zum Einsatz, um die Bohrzeit zu verkürzen. Auch hier gab es keine Schwierigkeiten beim Bohren des Kernholzes von beiden Seiten. Obwohl der kleine Bohrer nicht benutzt worden war, waren beim Bohren keine Unterschiede zum ersten Stamm auszumachen und es entstand eine gerade und gleichmäßige Röhre, die anschließend mit dem großen Bohrer vergrößert wurde.



Abb. 7: Bohren mit dem großen Bohrer



Abb. 8: Beide Stämme sind durchbohrt.

Für die Verbindung der beiden fertigen Wasserrohre wurde als Ersatz für die im archäologischen Befund auftretenden Deichelringe ein handelsübliches Stück Ofenrohr von 10 cm Durchmesser genutzt. Mit einem Stechbeitel wurde vorsichtig eine Nut für den Metallring in die Endstücke geschlagen. Da das Lärchenholz relativ weich ist, konnte der Ring einfach auf die Nuten beider Rohre aufgesetzt werden; mit einem schweren Vorschlaghammer wurden die Rohre behutsam zusammen auf den Ring geschlagen und waren nach kurzer Zeit fest und gleichmäßig miteinander verbunden.



Abb. 9: Verbindung der Holzrohre

Der Wasserdurchlauf bei unterschiedlichem, leichten Gefälle gestaltete sich einwandfrei. Restliche Späne und Staub wurden ausgespült. Eine weitere Abdichtung war nicht nötig. Der passgenau eingesetzte Metallring ist also wohl völlig ausreichend, um eine dichte Verbindung zu gewährleisten.



Abb. 10: Das fertige Rohr vor und während des Einsatzes

Ergebnisse des Experimentes

Um die Ergebnisse des Experiments bewerten zu können, werden zunächst noch einmal die Hauptfragestellungen genannt. Anschließend wird geklärt, inwiefern diese beantwortet werden konnten.

1) Wie stellen sich Funktion und Funktionalität der Deichelbohrer dar?

Die Deichelbohrer erfüllen genau die Funktion, die in der Literatur beschrieben wird. Hat sich die Spitze des Löffels erst einmal in das Holz eingedreht, schälen die scharfkantigen Seiten eine gleichmäßige, kreisrunde Röhre aus dem Holz. Ein unbeabsichtigtes Verrutschen oder schiefes Bohren ist bei entsprechendem Aufbau im Grunde nicht möglich, da die Form des Löffels selbst eine gerade Führung bedingt. Vom Beginn bis zum Ende des Experiments erfüllten alle drei Bohrer zuverlässig ihren Zweck. Beschädigungen oder eklatanter Verschleiß waren nicht festzustellen; das Metall an den Kanten des Löffels war zwar leicht abgenutzt (siehe Abb. 8), die Schärfe der Löffel hatte aber keineswegs nachgelassen. Im Gegensatz zum modernen Spiralbohrer befördert der Löffelbohrer den Bohrabfall nicht aus dem Bohrloch. Wie erwartet worden war, stellten sich die anfallenden Holzspäne als lästiges und zeitraubendes Problem bei der Arbeit

des Bohrens heraus. Wichtiger Arbeitsschritt beim Bohren eines Deichsels muss also auch immer die Entfernung des Bohrabfalls aus dem Bohrloch sein, was sich mit zunehmender Tiefe zumindest langwierig gestaltet. Wie man hier in der römischen Antike vorgegangen ist, kann nur spekuliert werden. Vielleicht wird man auf eine ähnliche Methode gesetzt haben wie hier und die Späne in regelmäßigen Abständen aus dem Stamm geholt haben. Im Experiment hat sich der kleine Löffelbohrer als bestens geeignet dafür erwiesen. Vielleicht hat er auch in römischer Zeit diesen Zweck erfüllt?

2) Gibt es Probleme bei der Bohrung eines Stammes von zwei Seiten?

Diese Frage kann ganz klar mit „nein“ beantwortet werden. Ganz im Gegenteil erleichtert die Bohrung von zwei Seiten sogar den Arbeitsfluss, da bei einer kleineren Bohrtiefe der Bohrabfall leichter und schneller entfernt werden kann. Dieses vorteilhafte Vorgehen erklärt zum Beispiel auch die Länge des Deichelbohrers von der Saalburg (127,5 cm)³⁵, der zu kurz für ein ganzes Rohr ist, sich aber für die Bohrung von zwei Seiten eignet. Voraussetzung für das exakte Aufeinandertreffen beider Bohrungen ist aber der richtige Aufbau von Bohrer und Stamm auf vertikal und horizontal gleicher Höhe. Hiermit kann vielleicht auch eine Antwort auf die von E. Hollstein aufgeworfene Frage, inwiefern eine zweiseitige Bohrung bei Segmentstücken, d.h. außerhalb des Kernholzes, praktikabel war, gegeben werden:³⁶ Vermutlich war es auch hier einfach eine Frage der richtigen Fixierung und Justierung von Holz und Bohrer, die über die Gleichmäßigkeit der Röhren entschied.

3) Mit welchem relativen Zeitaufwand ist für die Herstellung eines Wasserrohres zu rechnen?

Diese Frage ist nicht eindeutig zu beantworten. So gab die subjektiv sehr lange Dauer des Bohrens zunächst allen Beteiligten eine harte Nuss zu knacken. Immer wieder kam während der Durchführung des Experiments die Frage auf, wie ökonomisch denn so ein Leitungsbau mit Holzrohren sein konnte, wenn so viel Arbeitszeit aufgebracht werden musste. Das langwierige Bohren wurde sogar so sehr Thema der alltäglichen Diskussion, dass die gefühlte Langsamkeit Pate für den Titel dieses Beitrags stehen musste. Aus der Rückschau wirkt aber die tatsächliche Arbeitszeit viel weniger dramatisch: Wie be-

³⁵ Siehe Anm. 21.

³⁶ Siehe oben.

reits dargelegt, nahm die komplette Durchbohrung des ersten Stammes etwa 22 Stunden in Anspruch, wobei hier allerdings alle Unterbrechungen einbezogen sind. Rechnet man diese weg und außerdem dazu, dass ein geübter römischer Deichelbauer sein Handwerk verstand und sich nicht erst in die Materie einarbeiten musste, lässt sich diese Zeitangabe mit Sicherheit mindestens halbieren. Außerdem muss der Faktor Material genau berücksichtigt werden: Ganz fälltfrisch war die Lärche im Experiment nicht mehr; es ist durchaus für einen noch fälltfeuchten Baum eine noch kürzere Bohrdauer anzunehmen, da hier kein so starkes Splintern des Holzes, also größere und leichter zu entfernende Späne zu erwarten sind.

Vielleicht muss man einen Tag, vielleicht sogar weniger, für die Herstellung eines Deichels (natürlich derselben Länge von 150 cm) durch eine Person rechnen. Jetzt erscheint die Nutzung von Holzwasserleitungen gar nicht mehr so unwirtschaftlich, sondern eher günstig. Ist doch Holz in der Antike ein relativ billiges Material, das in der Regel nicht weit transportiert werden muss; der technische Aufwand ist ziemlich gering und nach dem Bohren und Verbinden der Holzrohre ist die Leitung sofort einsatzbereit.

4) Welche Anforderungen an technisches Know-How bzw. handwerkliches Geschick stellt der Vorgang des Deichelbohrens an die Beteiligten?

Der reine Vorgang des Bohrens kann im Grunde von jeder körperlich gesunden Person ausgeübt werden. Besonderes Geschick ist nur insofern nötig, als dass der Bohrer sensibel und nicht mit roher Kraft in das Holz gedreht werden muss. Prinzipiell ist also anzunehmen, dass für den Holzleitungsbau in den römischen Städten, Gemeinden und Militärlagern nördlich der Alpen einfache Tagelöhner, Kleinbauern und arbeitslose Handwerker³⁷ oder Soldaten³⁸ unter der Aufsicht der Ingenieure und Spezialisten eingesetzt wurden.

Hinsichtlich der Verbindung der Holzrohre durch Deichelringe zeigte sich, dass keine weitere Abdichtung oder ein Aufquellen des Holzes erforderlich ist. Eingewendet werden muss allerdings, dass das Ringstück leicht in die vorgefertigte Nut in das recht wei-

³⁷ Vgl. Eck 1987, 137.

³⁸ Kritisch zur Rolle des Militärs beim Ausbau der Infrastruktur Eck 2016, v.a. 204-207, auch mit dem Verweis auf frühere Studien; Eck weist darauf hin, dass der subsidiäre Beitrag des Kaisers bzw. des Heeres zu infrastrukturellen Baumaßnahmen in den Provinzen nicht zu hoch eingeschätzt werden darf, hebt aber am Beispiel zweier Inschriften auf zwei Steintrommeln einer Druckwasserleitung nach Jerusalem die Rolle des Militärs als Produzent von Bauteilen hervor.

che Lärchenholz eingetrieben werden konnte. Man darf wohl behaupten, dass dies bei um einiges härterem Eichenholz vielleicht nicht so problemlos erfolgen und möglicherweise eine aufwendigere handwerkliche Anpassung notwendig sein dürfte.

Trotz der Menge der Ergebnisse ließe sich dieses Experiment zum Wasserleitungsbau mit Holzrohren freilich noch fortführen und erweitern und steht nur am Anfang weiterer Fragen, die experimentell erforschbar sind. Besonders interessant wäre etwa der gleiche Versuch mit einem fälltfrischen Eichenstamm oder auch den von Plinius vorgeschlagenen Holzarten; dadurch ließen sich die hier gemachten Ergebnisse und die daraus gewonnenen Annahmen einordnen und ggf. korrigieren. Auf lange Zeit ließe sich sowohl der Verschleiß der Löffelbohrer als auch die Haltbarkeit der Holzrohre sowie die Qualität des durchlaufenden Wassers überprüfen. Daher versteht sich das vorliegende Experiment auch als Anstoß für weitere Forschungen im experimentalarchäologischen Bereich.

Quellenausgaben

- LUCIUS IUNIUS MODERATUS COLUMELLA, Zwölf Bücher über Landwirtschaft, hg. von W. Richter (Berlin 1981).
- SEXTUS IULIUS FRONTINUS, Wasser für Rom. Die Wasserversorgung durch Aquädukte, erl. und übers. von M. Hainzmann (München/Zürich 1979).
- CAIUS PLINIUS SECUNDUS D. Ä., Naturkunde, 37 Bde., hg. und übers. von R. König/G. Winkler (Zürich u. a. 1990–2004).
- CORNELIUS TACITUS, Germania. Lateinisch-deutsch, hg. und übers. von M. Fuhrmann (Stuttgart 1985).

Literatur

- Absmeier 2015: R. ABSMEIER, Der Holzbau in der Antike. Überlegungen zum vormittelalterlichen Holzhausbau (Gutenberg 2015).
- Cech 2011: B. CECH, Technik in der Antike (2. Aufl. Darmstadt 2011).
- Döring 2016: M. DÖRING, Römische Wasserversorgung - ein Überblick, in: Chr. Ohlig (Hg.), Neue Beiträge zur Hydrotechnik in der Antike. Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft 25 (Siegburg 2016) 63-117.
- Dues 1988: W. DUES, Das holzverarbeitende Handwerk im Wandel der Zeit (Bocholt 1988).
- Eck 2016: W. ECK, Autonomie und Subsidiarität: Die Wasserversorgung im Imperium Romanum, in: Chr. Ohlig (Hg.), Neue Beiträge zur Hydrotechnik in der Antike. Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft 25 (Siegburg 2016) 195-207.
- Eck 1987: W. ECK, Magistrate, „Ingenieure“, Handwerker. Zum Sozialstatus von „Wasserleitungsbauern“ in der römischen Welt, in: Lichtweiß-Institut für Wasserbau (Hg.), Wasserbau in der Geschichte. Kolloquium zu Ehren von G. Garbrecht (Braunschweig 1987) 129-154.

- Faltl/Riegert 2014: W. FALTl/CHR. RIEGERT, Die Eiche im Bayerischen Staatswald, in: LWF-Wissen 75 (2014) 48-52.
- Filgis 2005: M.N. FILGIS, Wasser und Abwasser. Infrastruktur für Soldaten und Bürger, in: Imperium Romanum. Roms Provinzen an Neckar, Rhein und Donau (Esslingen 2005) 190-194.
- Frontinus-Gesellschaft 2013: FRONTINUS-GESELLSCHAFT (Hg.), Historische Wasserleitungen. Gestern-heute-morgen (Leuven 2013).
- Gaitzsch 1980: W. GAITZSCH, Eiserne römische Werkzeuge. Studien zur römischen Werkzeugindustrie in Italien und den nördlichen Provinzen des Imperium Romanum, 2 Bde. BAR 78 (Oxford 1980).
- Grewe 2014: K. GREWE, Aquädukte. Wasser für Roms Städte. Der große Überblick - vom Römerkanal zum Aquäduktmarmor (Rheinbach 2014).
- Grewe 1988: K. GREWE, Römische Wasserleitungen nördlich der Alpen, in: Frontinus-Gesellschaft (Hg.), Die Wasserversorgung antiker Städte. Geschichte der Wasserversorgung 3 (Mainz 1988) 45-97.
- Grewe 1985: K. GREWE, Planung und Trassierung römischer Wasserleitungen. Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft Suppl. 1 (Wiesbaden 1985).
- Harnecker 1997: J. HARNECKER, Katalog der Eisenfunde von Haltern aus den Grabungen der Jahre 1949-1994. Bodenaltertümer in Westfalen 35 (Mainz 1997).
- Hollstein 1974: E. HOLLSTEIN, Eine römische Deichel aus Dillingen, Kreis Saarlouis, in: Beiträge zur Archäologie und Kunstgeschichte, Abt. Bodendenkmalpflege. Bericht der Staatlichen Denkmalpflege im Saarland 21 (1974) 101-105.
- Lamberth 1980: W. LAMBERTH, Alte Holzrohr-Wasserleitung in Udenheim, in: Frontinus-Gesellschaft (Hg.), Historische Beiträge über die Entwicklung wassertechnischer Anlagen. Frontinus-Schriftenreihe 2 (Köln 1980) 97-101.

- Lamprecht 1988: H.-O. LAMPRECHT, Bau und Materialtechnik bei antiken Wasserversorgungsanlagen, in: Frontinus-Gesellschaft (Hg.), Die Wasserversorgung antiker Städte. Geschichte der Wasserversorgung 3 (Mainz 1988) 129-155.
- Manning 1985: W.H. MANNING, Catalogue of the Romano-British Iron Tools, Fittings and Weapons in the British Museum (London 1985).
- Mutz 1980: A. MUTZ, Ein Fund von Holzbearbeitungs-Werkzeugen aus Augst Insula 31, in: Jahresberichte aus Augst und Kaiseraugst 1 (1980) 117-131.
- Nenninger 2001: M. NENNINGER, Die Römer und der Wald. Untersuchungen zum Umgang mit einem Naturraum am Beispiel der römischen Nordwestprovinzen. Geographica Historica 16 (Stuttgart 2001).
- Obmann 2001: J. OBMANN, Wasserleitungen, in: Th Fischer (Hg.), Die römischen Provinzen. Eine Einführung in ihre Archäologie (Stuttgart 2001) 91-93.
- Pietsch 1983: M. PIETSCH, Die römischen Eisenwerkzeuge von Saalburg, Feldberg und Zugmantel, in: Saalburg-Jahrbuch 39 (1983) 5-132.
- Schnappauf 1980: J. SCHNAPPAUF, Holzrohr-Wasserleitungen, in: Frontinus-Gesellschaft (Hg.), Historische Beiträge über die Entwicklung wassertechnischer Anlagen. Frontinus-Schriftenreihe 2 (Köln 1980) 89-96.
- Schneider 2010: H. SCHNEIDER, Die Wasserversorgung im Imperium Romanum, in: K. Aydin/M. Fansa (Hg.), Wasserwelten - Badekultur und Technik. Begleitschrift zur Ausstellung Wasserwelten im Landesmuseum Natur und Mensch Oldenbourg, 15. August - 17. Oktober 2010 (Mainz 2010) 72-87.
- Schneider 1997: H. SCHNEIDER, Die Gaben des Prometheus. Technik im Antiken Mittelmeerraum zwischen 750 v. Chr und 55 n. Chr., in: D. Hägermann/H. Schneider, Landbau und Handwerk 750 v. Chr. bis 1000 n. Chr. Propyläen Technikgeschichte 1 (Neuausgabe Berlin 1997) 17-313.

- Tölle-Kastenbein 1990: R. TÖLLE-KASTENBEIN, Antike Wasserkultur (München 1990).
- Wikander 2000: Ö. WIKANDER, Handbook of Ancient Water Technology (Leiden 2000).
- Zimmer 1982: G. ZIMMER, Römische Berufsdarstellungen. Archäologische Forschungen 12 (Berlin 1982).

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: © Haselburg-müller (Own work): CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>), via Wikimedia Commons.
- Abb. 2-10: Eigene Bilder.

Nachbau einer römischen Doppelkolbendruckpumpe

Alina Bell, Alexander Göller, Beatrice Spengler

Einleitung

„Wasser ist (...) ganz unentbehrlich für das Leben, die Freuden des Lebens und den täglichen Gebrauch.“¹

Wasser ist seit jeher eine essentielle Ressource, weshalb die Wasserversorgung auch im Römischen Reich besonders wichtig war. Um die Wasserversorgung zu garantieren, brauchte man fließendes Wasser, welches durch Leitungen in Städte und Siedlungen befördert wurde. War dies nicht gegeben, half man sich damit, Wasser aus Brunnen zu schöpfen.² Das Brunnenwasser wurde entweder manuell mit einem Schöpfbehälter oder mit Hilfe einer Rolle, eines Flaschenzuges oder Hebels gehoben.³ Ab dem 1. Jh. v. Chr. verwendeten die Römer einen Pumpmechanismus, welcher es ermöglichte, das Wasser mit weniger Aufwand und Muskelkraft zu heben.⁴ Reste von gut einem Dutzend solcher Pumpen wurden nördlich der Alpen gefunden, etwa in Trier oder im *Vicus Belginum* (Wederath, Rheinland-Pfalz).⁵

Wasser hatte nicht nur eine praktische, sondern auch eine dekorative Funktion. Dies beschreibt zum Beispiel Frontinus in seinem Werk *De aquaeductu urbis Romae*:

„(...) bewässerte Felder habe ich vorgefunden, dazu noch Kaufläden, ferner Speisezimmer und nicht zuletzt auch Verführungsstätten aller Art, die mit Laufbrunnen ausgestattet waren, welche ohne Unterbrechung Wasser spendeten.“⁶

¹ Vitruv. 8,1,1.

² Vgl. Colum. 1,5,1-15: „Fehlt fließendes Wasser, so ist in der näheren Umgebung Brunnenwasser zu sichern (...“; Plin. nat. hist. 19,20: „Dass man mit Landhäusern Gärten verbinden und diese feucht erhalten müsse, darüber kann kein Zweifel obwalten; glückt es, einen Fluss in der Nähe zu haben, so bewässere man sie durch diesen, wo nicht, durch ein Schöpfrad, durch Pumpwerke oder einen Ziehbrunnen.“

³ Vgl. CÜPPERS 1992, 31.

⁴ Vgl. CECH 2011, 106.

⁵ Siehe NEYES 1972, 109-121.

⁶ Frontin. aqu. 76.

Zurückzuführen ist die Erfindung der Druckpumpe wohl auf den aus Alexandria stammenden Mechaniker Ktesibios (1. Hälfte des 3. Jh. v. Chr.). Seine Schrift „Pneumatik“ lag noch Vitruvius vor, welcher in seinem Werk *De architectura* eben diese Erfindung beschreibt.⁷ Es handelt sich dabei um eine „springbrunnenartige Wasserspritze mit einem durch Rückschlagventile verschließbaren Windkessel, der für einen kontinuierlichen Strahl sorgt.“⁸

Während Vitruvius und Heron von Alexandria von einer Pumpe aus Bronze berichten,⁹ wurden in kaiserzeitlichen Brunnen auch Pumpen aus Holz gefunden. Diese waren mit geringerem Aufwand herzustellen und vor allem wesentlich kostengünstiger.¹⁰

Eingesetzt wurden die Pumpen zum Wasserheben in Brunnen, als Lenzpumpe (und möglicherweise auch als Flammenwerfer) auf Schiffen oder zur Feuerbekämpfung.¹¹ Letzteres wird explizit bei Heron von Alexandria ausgeführt.¹² Im Gegensatz zu Druckpumpen mit nur einem Kolben, bei welchen das Wasser nur stoßweise an die Oberfläche kommt, sorgen Doppelkolbendruckpumpen für einen kontinuierlichen Wasserfluss. Die Leistung einer Druckpumpe wird durch einzelne Faktoren, wie dem Durchmesser und der Anzahl der Kolben, der Länge des Pumphubes und der Förderhöhe, sowie der Geschwindigkeit, mit der die Pumpe betätigt wird, beeinflusst.

Die Autoren dieses Beitrages bauten im Archäologischen Park Cambodunum eine möglichst originalgetreue römische Doppelkolbendruckpumpe nach, um deren Funktionsweise und Effektivität zu testen. Als Basis für das Experiment dienten neben den archäologischen Funden die Schriften der antiken Autoren Plinius, Vitruvius und Heron von Alexandria. Oberstes Ziel eines jeden Experiments sollte der Erkenntnisgewinn sein. Hierzu müssen schon vor der Durchführung gewisse Schwerpunkte und Ziele gesetzt werden.¹³ Bereits 2012 wurde im Rahmen eines Projekts der Universität Augsburg im Europäischen Kulturpark Bliesbruck-Reinheim ein Experiment zur Herstellung einer römischen Doppelkolbendruckpumpe durchgeführt.¹⁴ Während damals der Schwer-

⁷ Vitr. 10,7.

⁸ KRAFFT 1999, 876.

⁹ Heron pneum. 1,28; vgl. CECH 2011, 107.

¹⁰ Vgl. CECH 2011, 109.

¹¹ Vgl. CECH 2011, 107.

¹² Heron pneum. 1.

¹³ Vgl. RICHTER 2005, 96-100.

¹⁴ Siehe KOEPFER 2014.

punkt auf der Untersuchung der Herstellung der Zylinderbohrungen einer römischen Doppelkolbendruckpumpe lag, konzentrierte man sich diesmal auf die Funktion der Pumpe. Außerdem kam dem Experiment auch eine didaktische Funktion zu: Die Herstellung und das Erproben fand in Zusammenarbeit mit dem Archäologischen Park Cambodunum in Kempten statt und ermöglichte einem breiten Publikum, den Verlauf des Experiments zu beobachten und sich selbst aktiv daran zu beteiligen.

Im Folgenden wird zunächst auf Quellen und Literatur eingegangen, auf die zur Herstellung der Doppelkolbendruckpumpe zurückgegriffen wurde, bevor die Durchführung des Experiments selbst erläutert wird. Hierbei werden sowohl die Ergebnisse des Versuchs, als auch die Effektivität der Pumpe und Probleme beim Bau und der Bedienung dargestellt.

Quellenbasis und Forschung

Betrachtet man die literarischen Quellen, treten vor allem folgende Autoren in den Vordergrund: Vitruvius, Heron von Alexandria und Plinius der Ältere.¹⁵ Daneben finden Druckpumpen oder deren Funktion auch bei Seneca dem Älteren/Jüngeren, Plinius dem Jüngeren und Apollodoros von Damaskus Erwähnung.¹⁶ Es ist in den Quellen jedoch lediglich von Pumpen aus Metall die Rede. Diese unterscheiden sich aber in ihrer Funktion nicht von den Pumpen aus Holz.¹⁷ Durch die Aufzeichnungen von Vitruvius, welcher die Funktion einer Bronzepumpe detailliert beschreibt,¹⁸ und die archäologischen Überreste von Holzpumpen wird deutlich, dass sich die Pumpen in ihrem Aufbau im Wesentlichen gleichen, was eine identische Funktionsweise belegt. Lediglich die Bauart weicht voneinander ab: Während der Eichenpumpstock aus einem einzigen Holzstück besteht, wurde die Metallpumpe (meist Bronze) aus mehreren Teilen zusammengebaut.¹⁹

Die aufschlussreichste Quelle stellen die Schilderungen des Vitruvius dar. Er erläutert in seinem Werk *De architectura* detailliert den Aufbau und die Funktionsweise einer Doppelkolbendruckpumpe nach dem Vorbild des Ktesibios, welcher, nach Meinung von Vi-

¹⁵ Vitruv. 10,7; Heron pneum. 1,28; Plin. nat. hist. 2,65,166 und 19,20,60; vgl. hierzu ALBRECHT 2014, 71.

¹⁶ Sen. nat. 2,16; Sen. contr. 10,9; Plin. epist. 10,33; Apollod. polior. 174,1-7; vgl. hierzu STEIN 2007a, 30-33.

¹⁷ Vgl. STEIN 2007a, 24; CECH 2011, 109.

¹⁸ Vitruv. 10,7,1-5.

¹⁹ Vgl. STEIN 2007a, 23.

truvius, der Erfinder dieses Mechanismus war.²⁰ Dabei wird jedoch die genaue Funktion der Pumpe nicht deutlich. Heron von Alexandria bezeichnet den beschriebenen Pump-mechanismus als Feuerspritze.²¹ Es handelt sich dabei um eine zweizylindrige Druckpumpe mit einem Wassertank. An die Auslassleitung war eine Vorrichtung angebracht, mit welcher man den Wasserstrahl in mehrere Richtungen lenken konnte. Mit ihr war nun auch eine 360°-Drehung möglich und zudem die Wasserdruck-Regulierung durch Anbringung eines L-förmigen Aufsatzes. Da sie in ihrer Funktion als Feuerlöscher mobil sein musste, war die Pumpe wohl auf einem fahrbaren Wagen montiert oder es waren Räder an der Pumpe selbst befestigt. Dies erwähnt Heron jedoch nicht explizit.²² Plinius der Ältere berichtet hingegen von einem *organon pneumaticon*, einem Bewässerungssystem für einen Garten, bei welchem das Wasser aus einem Brunnen gepumpt wurde.²³

Orientiert hat sich dieses Experiment vor allem an den archäologisch erhaltenen Überresten von Pumpstücken aus Holz. Richard J.B. Stein zählt hierzu 18 Fundorte solcher Pumpen auf, wobei heute noch Überreste von dreizehn Pumpen erhalten sind.²⁴ Stein macht zudem darauf aufmerksam, dass nur die Hälfte der Funde archäologisch erfasst ist und die Dokumentation damit lückenhaft und zudem sehr unterschiedlich ausfällt.²⁵ Daneben gibt es zehn Funde und drei Fragmente von Pumpen aus Metall (Bronze).²⁶ Die erste Bronzepumpe wurde bereits 1795 in *Castrum Novum* (Giulianova, Abruzzen) gefunden.²⁷ Stein behandelt das Thema der römischen Doppelkolbendruckpumpen sehr

²⁰ Vit. 10,7,1.

²¹ Heron pneum. 1,28.

²² Vgl. CECH 2011, 108f: Gefunden wurde eine solche Pumpe nach Heron unter anderem 1889 im Bergwerk von Sotiel/Coronado (Spanien), die sogenannte „Pumpe von Valverde Huelva“ (Archäologisches Nationalmuseum Madrid).

²³ Plin. nat. hist. 19,20,60; vgl. ALBRECHT 2014, 71.

²⁴ STEIN 2007a, 19 und 26; Fundorte: Gebiete an Mosel und Rhein: Benfeld (1868), Bertrange (1998; fast komplett erhalten), Fleischstraße/Trier (1972), Herrenbrunnchen/Trier (1921), Martberg (1995), Oberkirch (1958), Riöl (1988), Sablon/Metz (1905), Amphitheater/Trier (1908), Wederath (1971); Rom und Mailand: Mentuccia (ca. 1950), San Giovanni (1935), Speronari (1961), Velasca (1949); Südengland: Silchester (1895), Tarrant Hinton (1983; 26,4 m tief, mit Kolben erhalten); Südfrankreich: Lyon (1975), Périgeux (1975).

²⁵ STEIN 2007a, 26 und 36; nicht mehr erhalten und nur noch aus Aufzeichnungen bekannt: Mentuccia, Speronari, Trier (Amphitheater, Herrenbrunnchen, Fleischstraße).

²⁶ Vgl. die Liste der Fundorte bei STEIN 2007a, 27.

²⁷ Vgl. STEIN 2007a, 26.

detailliert und gibt aufschlussreiche Informationen zu den Pumpen selbst, ihren Fundorten und Einsatzbereichen.²⁸

Welche Vorteile boten Pumpen gegenüber einfachen Eimern? Zwar waren Eimer um einiges leichter und kostengünstiger in der Anschaffung, jedoch lange nicht so effizient. Das Hinauf- und Hinunterfahren bzw. das Befüllen und Leeren des Eimers war viel aufwendiger als das Heben des Wassers durch den kontinuierlichen Wasserfluss einer Pumpe.²⁹ Vor allem in Gebieten, wo der Grundwasserspiegel besonders niedrig war, konnte dies zu einem großen Problem werden. Gerade hier kamen wohl Pumpen zum Einsatz. Im Verhältnis zu der Anzahl der ausgegrabenen römischen Brunnen sind Funde von Pumpen darin jedoch sehr selten.³⁰ Stein nimmt an, dass der Aufwand der Herstellung und Installation zu groß war, um sie den konventionellen Methoden des Wasserholens vorzuziehen. Zur Feuerbekämpfung waren Pumpen besonders gut geeignet, da sie es ermöglichten, auch unerreichbare Feuerherde zu löschen, und das Feuerlöschen durch den gezielten, kontinuierlichen Fluss um einiges effektiver war.

Es gab gleichermaßen Pumpen aus Metall und aus Holz. Welche Vorteile und welche Nachteile könnten Pumpen aus Holz gehabt haben? Holzpumpen waren leichter und kostengünstiger in der Herstellung, Instandhaltung und Reparatur, sowie Fixierung in fester Position. Zudem hält das Holz durch seine Elastizität dem aufkommenden Wasserdruck besser Stand. Bevorzugt für den Bau der Pumpstöcke und Kolben wurde Eiche wegen seiner guten Druck- und Wasserresistenz. Allerdings sind Pumpen aus Holz wesentlich schwerer und dadurch nicht so leicht zu transportieren. Außerdem ist Holz nicht so langlebig wie Metall. Pumpen aus Metall sind aus Einzelteilen hergestellt, welche so zusammengebaut werden müssen, dass sie dem immensen Wasserdruck, der im Inneren der Pumpe entsteht, standhalten. Dies erfordert die Arbeit von Experten. Stein nimmt aufgrund verschiedener Beobachtungen an, dass die Leistung von Bronze- und Holzpumpen die Gleiche gewesen sein muss.

Eine letzte Frage, die sich in diesem Zusammenhang stellt, ist die der Nutzung solcher Pumpen. Die meisten der aufgezählten Funde stammen aus Brunnen.³¹ Stein geht je-

²⁸ Vgl. für die zusammenfassenden Ausführungen im Folgenden ausführlich STEIN 2007a, 22-39 und STEIN 2007b.

²⁹ Vgl. ALBRECHT 2014, 70.

³⁰ Die Mehrzahl der Pumpenfunde wiederum ist aber hauptsächlich in Brunnen zu lokalisieren, vgl. STEIN 2007a, 36.

³¹ Vgl. STEIN 2007a, 36: außer Martberg (am Boden eines Brennofens), Riol (in modernem Schutt), Amphitheater/Trier (im Keller des Theaters).

doch davon aus, dass die Pumpen selten in Brunnen eingesetzt wurden.³² Die Masse an Brunnenfunden lässt sich eventuell dadurch erklären, dass gerade Pumpen aus Holz an der Oberfläche nicht mehr erhalten sind - im Gegensatz zu in feuchten Böden belassenen Pumpen. Zudem könnte das Material der Pumpen nach Gebrauch wiederverwendet worden sein. Pumpen in tiefen Brunnen waren hingegen schwer zu erreichen und wurden meist an Ort und Stelle belassen. Lediglich die gut erreichbaren Metallrohre wurden teilweise entfernt. Stein geht davon aus, dass Pumpen vor allem an der Oberfläche benutzt wurden - entweder fest installiert, um Wasser abzutragen (zum Beispiel aus Schiffen oder aus Minen), oder portabel, meist zur Feuerbekämpfung.

Die Funktionsweise einer Doppelkolbendruckpumpe erklärt Adolf Neyses, der sich ausführlich mit den Funden im Trierer Umland auseinandergesetzt hat, folgendermaßen (vgl. Abb. 1):

„Bei Aufwärtsbewegung des Kolbens 1 entsteht ein Sog, der die Ventilklappe 1a durch das einströmende Wasser anhebt. Gleichzeitig wird durch das synchron arbeitende Hebelgestänge der Kolben 2 nach unten gedrückt. Durch den Kompressionsdruck schließt sich zunächst das Klappventil 2a, gleichzeitig hebt sich das Ventil 2b, und das sich in der Druckkammer befindliche Wasser muss bei weiterem Abwärtsdruck den Weg durch die Steigleitung 3 nach oben nehmen. Durch das synchron arbeitende Kolbensystem wird bei gleichmäßiger Bewegung des Pumpenschwengels ein kontinuierlicher Wasserfluß erzeugt.“³³

In einem seiner Aufsätze betrachtet Neyses besonders den 1971 im *Vicus Belginum* gefundenen Pumpstock (Abb. 1, links).³⁴ Dieser Fund ist insofern aufschlussreich, als er, neben dem sehr guten Erhaltungszustand, in einer erstaunlichen Tiefe von 16 m gemacht wurde. Zwar lag die Pumpe nicht mehr in ihrer ursprünglichen Verankerung, man kann jedoch trotzdem davon ausgehen, dass sie besonders tief gesetzt worden war, da der *Vicus Belginum* auf einem Höhenzug am Hang liegt und die Wasserversorgung durch das Grundwasser dementsprechend schwierig gewesen sein musste.³⁵

³² STEIN 2007a, 22: In Silchester wurde in 80 römischen Brunnen lediglich eine Pumpe gefunden.

³³ NEYSES 1975, 308f.

³⁴ NEYSES 1972.

³⁵ NEYSES 1972, 109.

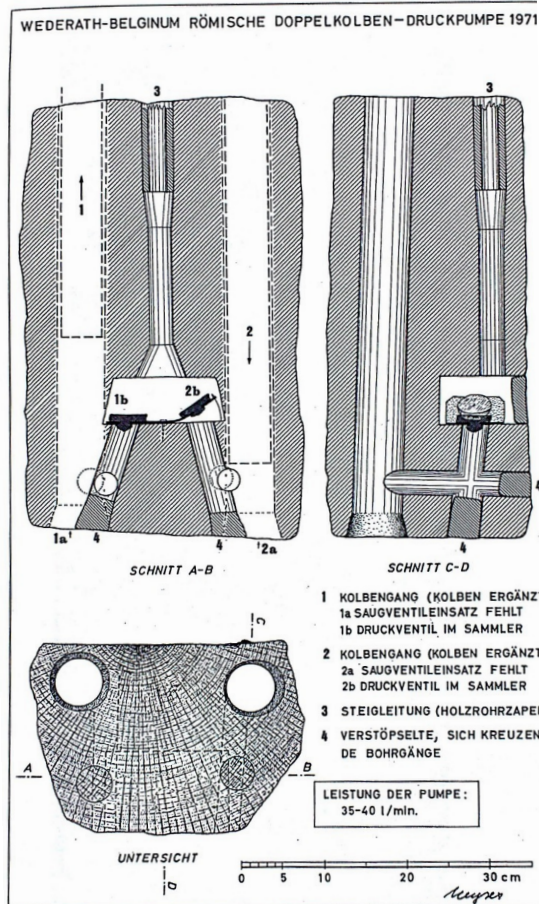


Abb. 1 Belgium, Pumpenstock

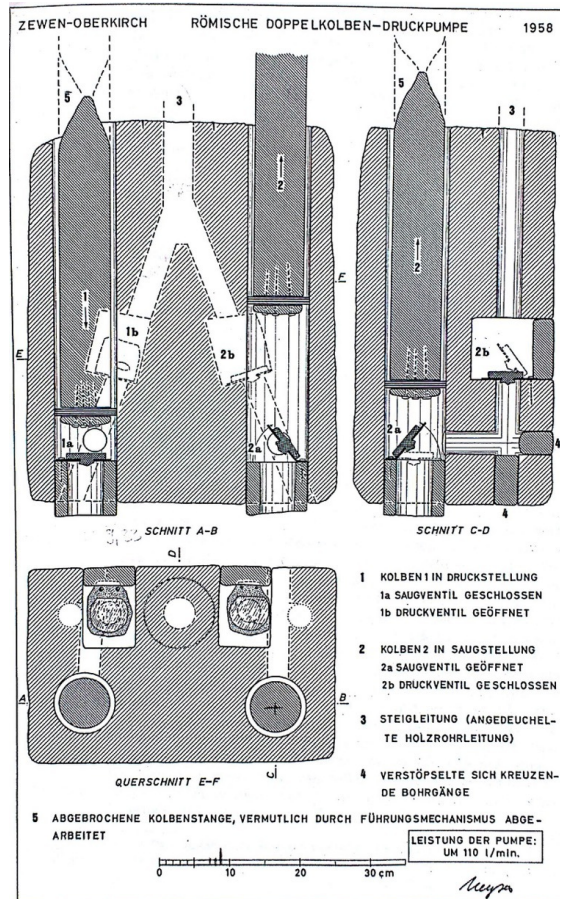


Abb. 3 Zewen-Oberkirch, Pumpenstock

Abb. 1: Die Doppelkolbendruckpumpen aus Wederath / Vicus Belgium und Zewen-Oberkirch (nach Neyses)

Der Pumpstock ist aus der Hälfte eines Eichenstocks hergestellt und hat die Maße 54 x 32 x 23 cm (H/B/T). Die Kolbengänge messen 6 cm im Durchmesser und sind in 1,5 cm Abweichung von der Parallelen längs durch den kompletten Pumpstock gebohrt.³⁶ Dabei sind die unteren Enden der Kolbengänge konisch erweitert, wo die Saugventile eingesetzt waren.³⁷ Zwei Bohrgänge, welche sich kreuzen, verbinden schließlich die Kolbengänge mit dem Sammler (Druckventilkammer), der nach außen hin mit einer Eichenplatte verschlossen wurde und von dem aus das Wasser schließlich über eine Steigleitung nach oben befördert wurde. Diese Bohrgänge waren nach außen hin durch Eichenholzpfropfen verschlossen. Als Verbindung zwischen Bohrgängen und Sammler ließen sich zwei Druckventile, bestehend aus Lederklappen mit Bleigewichten, nachweisen. Diese Doppelventilkammer stellte wohl die Regel dar, einzig in Zewen-Ober-

³⁶ Vgl. NEYSES 1972, 112.

³⁷ Saugventileinsätze sind unter anderem aus Zewen-Oberkirch bekannt (siehe Abb. 1, rechts).

kirch bestand der Pumpstock aus zwei getrennten Kammern mit je einem Ventil (Abb. 1, rechts).³⁸ Nachweise für die Kolben lassen sich vor allem in Zewen-Oberkirch finden, da diese hier sehr gut erhalten sind. Sie sind etwas dünner als die Kolbengänge und am unteren Ende mit vier Lederscheiben versehen, um eine optimale Dichtung zu erhalten. Reste solcher Kolben findet man unter anderem auch in Metz-Sablon.³⁹

Die Außenkonstruktion, mit welcher der Pumpstock im Brunnenschacht verankert worden sein musste, ist nicht mehr erhalten. Es weisen lediglich einige Reste, unter anderem am Pumpstock selbst, auf die Existenz einer gewissen Befestigungsvorrichtung hin, so zum Beispiel eine Einkerbung oder auch Nagellöcher an der Rückwand des Pumpstocks. Neben dem Pumpstock wurde auch ein 2,5 m langes, vierkantiges Eichenholzrohr gefunden. Es verjüngt sich nach oben (unten: 12 x 12 mm, oben: 8 x 8 mm) und die Rohrbohrungen waren an den Enden konisch erweitert. Zudem besaß das Rohr eine Kammer, in welcher ein Rückschlagventil angebracht war. Dadurch scheint die Funktion des Holzrohrs als Beförderungsmittel für das Wasser nach oben bewiesen zu sein.⁴⁰

Neyses erwähnt noch weitere Funde von Pumpstöcken mit einer Bleifütterung in den Kolbengängen (Silchester, Benfeld im unteren Elsaß, Metz-Sablon und Trier-Herrenbrünchen), die wohl bewirkte, dass sich die ledernen Kolbenenden nicht so leicht abnützten.⁴¹

Bereits in den 70er Jahren des 20. Jh. führte A. Neyes ein Experiment durch, welches die maximale Förderhöhe einer Doppelkolbendruckpumpe ermitteln sollte.⁴² Hier stellte sich die Gefahr des Ausknickens der Steigleitung bei einer größeren Höhe als Problem heraus. Um dem vorzubeugen, brachte man im Abstand von zwei Metern Halterungen an. In diesem Experiment lag das Augenmerk nicht auf dem authentischen Nachbau der Pumpe, sondern auf der Leistung, weswegen man andere Materialien, wie einen Plastikschlauch für die Steigleitung und Metallstäbe als Kolbenverlängerung über dem Pumpstock benutzte, um den Bau zu erleichtern. Ergebnis dieses Versuchs war, dass die Pumpe selbst bei einer Förderhöhe von 20 Metern einwandfrei funktionierte. Neyses,

³⁸ Vgl. NEYES 1972, 114.

³⁹ Vgl. NEYES 1972, 114.

⁴⁰ Vgl. NEYES 1972, 114.

⁴¹ Vgl. NEYES 1972, 118.

⁴² Vgl. NEYES 1972, 120; siehe auch ALBRECHT 2014, 75.

der das Experiment in seiner Untersuchung beschreibt, schlussfolgert daraus, dass die Höhe einzig durch die Bruchgrenze des Materials bedingt ist.⁴³

Fragestellung

In diesem Experiment sollte sowohl die Funktionsweise, als auch die Leistung der Pumpe getestet werden. Da im vorhergehenden Experiment lediglich ein Pumpstock ohne Außenkonstruktion nachgebaut wurde,⁴⁴ blieben noch etliche Fragen zur Bedienung der Pumpe und deren mechanischer Funktionsweise offen. Aus diesem Grund lag das Augenmerk bei diesem Experiment weniger auf der authentischen Herstellung, sondern auf der Schaffung eines voll funktionsfähigen Modells.

Zu klären war auch, ob die nachgebaute Pumpe tatsächlich, wie laut Berechnungen, einen kontinuierlichen Wasserstrahl erzeugt, oder sich bei der praktischen Umsetzung Schwierigkeiten ergeben. Zudem war es von Interesse, inwieweit die Abdichtungen dem Wasserdruck standhalten und welche Alternativen sich evtl. böten. Gegenstand des Versuchs war auch, ob die Kolben genügend Druck aufbauen können, um das Wasser in der Steigleitung eine gewisse Höhe nach oben zu pumpen.

Als interaktives Ausstellungsstück kann die Pumpe, in einer Art Langzeitexperiment, auch auf Haltbarkeit und Verschleiß untersucht werden. Hierfür sollten später Messpunkte an und in der Pumpe festgelegt werden, die in regelmäßigen Abständen untersucht werden sollen.

Durchführung des Experiments

Für dieses Experiment wurde ein Modell einer römischen Doppelkolbendruckpumpe gebaut, deren Funktionsweise und Haltbarkeit untersucht werden sollte. Zur Vorbereitung wurden im vorangehenden Semester Recherchen angestellt, eine Material- und Werkzeugliste erstellt und die Arbeitsschritte durchgeplant. Da sich unsere Untersuchungen auf die Funktionsweise und Leistung der Pumpe bezogen, wurde in diesem Experiment ein maschinell grob vorgefertigter Pumpstock und Kolben verwendet. Nur noch die kleineren Bohrungen am Pumpstock wurden manuell vorgenommen.⁴⁵ Zunächst wurde ein Eichenblock mit einer Kettensäge auf die Maße 20 x 30 x 50 cm zuge-

⁴³ Vgl. NEYSES 1972, 120.

⁴⁴ Siehe oben S. 80 mit Anm. 14.

⁴⁵ Für die vollständige Liste des verwendeten Materials und der Werkzeuge siehe Anlage 2.

schnitten.⁴⁶ Wichtig ist hierbei, dass dieser aus einem halbem Stamm angefertigt wird, damit kein Kernholz enthalten ist, da der Pumpstock sonst bei Änderungen der ihn umgebenden Feuchtigkeit oder Nässe anfällig für Risse im Holz wird. Bezüglich der Kolbengänge war es zunächst problematisch, eine Firma zu finden, die über einen so breiten und langen Bohrer verfügte, um ein Loch mit einem Durchmesser von 8 cm zu bohren. Mit freundlicher Unterstützung von Herrn Herrmann Schmid von der Firma Pletschacher in Dasing gelang dies aber schließlich mit einem parallelen Senker mit Führungsdorn. Die Unebenheiten, die beim Bohren entstanden und die Kolben anecken ließen, wurden so gut wie möglich mit Raspeln und Schleifpapier behoben.

Im weiteren Verlauf wurden Gewichte aus Blei gegossen: Zwei Gewichte für Lederklappen an der unteren Seite des Pumpstocks und zwei für die Lederklappen in der Ventilkammer (jeweils Ø 3 cm bzw. 1 cm; siehe Abb. 2).



Abb. 2: Guss der Bleigewichte für den Pumpstock

Die Ventilkammer wurde ausgestemmt (Abb. 3). Für die Steigleitung wurde von oben eine Verbindung bis zur Ventilkammer gebohrt (Ø 2,5 cm). Um die Verbindung zwischen den Kolbengängen und der Ventilkammer herzustellen, wurden zwei Löcher von der Unterseite des Eichenblocks zur Ventilkammer und Löcher von der Vorderseite des Pumpstocks zum Kolbengang (Ø 2,5 cm) gebohrt. Die Bohrungen wurden mit Holzpfropfen verstöpselt und mit Birkenpech abgedichtet (Abb. 3). Für die Ventile wurde ein Lederstreifen auf Größe der Ventilkammer zurechtgeschnitten. Zur Befestigung der

⁴⁶ Alle einzelnen Arbeitsschritte beim Bau des Pumpstocks sind tabellarisch in Anlage 3 aufgeführt.

Bleigewichte am Lederstreifen wurde ein kleines Loch eingeschnitten, die Nut des Bleis durchgestochen und mit einem Hammer vernietet. Der Lederstreifen wurde schließlich so in der Ventilkammer festgenagelt, dass dieser die Bohrungen mit den Bleigewichten überdeckte. Zum Verschluss der Ventilkammer wurde eine Lederabdichtung zurechtgeschnitten, sowie ein Holzbrett angefertigt, in welches Löcher vorgebohrt wurden, damit das Holzbrett mit Holzdübeln befestigt werden konnte (Abb. 4). Mit Birkenpech wurde abgedichtet.



Abb. 3: Die Bearbeitung des Pumpstocks

Für die Unterseite des Pumpstocks wurden eine Lederdichtung in der passenden Größe und Ventilkappen aus Leder auf die Größe der Kolbengänge zugeschnitten. Die Bleigewichte wurden auch hier wie oben beschrieben an den Ventilkappen befestigt. Im Anschluss wurde eine Holzplatte (mit zwei kleineren Löchern à Ø 2,5 cm) auf Höhe der Ventile angebracht. Die Holzplatte und das Leder wurden am Pumpstock mit Holzdübeln befestigt. Damit die Holzplatte optimal aufliegt, wurde stellenweise zusätzlich mit Lederstücken ausgeglichen. Diese von den Funden abweichende Bauweise sollte eventuelle Modifikationen und Reparaturen ermöglichen.

Die Kolben wurden grob mit einer Kettensäge zugeschnitten, dann auf einer Hobelbank mit Hilfe eines Zieheisens und einer Raspel bearbeitet bis sie rund waren und die passende Breite hatten. Der untere Teil war dabei wesentlich breiter (ca. 7 cm) als der obere Teil (3,5 cm), um genügend Spielraum für die leicht schräg stehenden Kolben zu schaffen.



Abb. 4: Lederabdichtung für die Ventilkammer

An dem unteren, breiteren Teil wurden je Kolben drei Schichten Leder auf die Größe des Kolbens zugeschnitten (Fleischseite zeigte zum Holz) und zusammen mit einem Bleigewicht mit Hilfe von drei Nägeln befestigt. Um die optimale Größe für die Bleigewichte zu erhalten, wurden die Kolben selbst als Form in den Gießsand gedrückt. Das Leder diente zur Abdichtung, damit das Wasser optimal von den Kolben angezogen wird (Abb. 5).



Abb. 5: Kolben für die Druckpumpe

Für einen effektiven Betrieb der Pumpe wurde nun nur noch eine Außenkonstruktion benötigt, die es dem Benutzer ermöglicht, über einen Pumpschwengel die Kolben abwechselnd herab zu drücken und nach oben zu ziehen. Dazu gibt es jedoch keine archäologischen Funde. Da wir keinen Brunnenschacht für unsere Pumpe ausheben durften, wurde beschlossen, ein möglichst einfaches Modell zu bauen, das lediglich die physikalische Funktionsweise nachahmt und keinen Anspruch auf historische Authentizität erhebt.

An den Seiten des Pumpstocks wurden vier 300 cm lange Kanthölzer befestigt, die als Gerüst fungierten, und a) an ihrem oberen Ende den Pumpschwengel tragen sollten, so-

wie b) am unteren Ende, wo der Pumpstock mit Schrauben und Stahlwinkeln daran befestigt wurde, 10 cm lange „Füße“ bildeten, so dass der Pumpstock nicht auf dem Boden auflag und immer von unten genug Wasser nachfließen konnte. Am oberen Ende wurden jeweils zwei der Streben mit einer 30 cm langen Querstrebe verbunden, die mit weiteren Winkeln und Schrauben befestigt wurde - dies sorgte für zusätzliche Stabilität. Als nächster Schritt wurde nun in die Querstreben jeweils mittig ein Loch gebohrt und schließlich das Rundholz als Achse hindurch gesteckt. So ließ sich der Pumpschwengel von zwei Seiten bedienen.

Dann wurde der Pumpschwengel mit den Kolben verbunden: Hierfür bedienten wir uns aufgrund der einfacheren Verarbeitung erneut zweier Kanthölzer (180 cm), doch hätte man ebenfalls auf Metallstangen zurückgreifen können. Mittels Gewindehaken in Kolben, Verbindungsstangen und Schwengel wurden die Verbindungen zwischen den einzelnen Teilen beweglich gemacht. Jeweils zwei Haken griffen ineinander, und wurden mit einer Zange zusammen gebogen, so dass Kolben und Pumpschwengel mit den sie verbindenden Kanthölzern einerseits fest verbunden waren - denn sie unterlagen starker mechanischer Belastung - und andererseits beweglich blieben.

Wir versuchten, die Befestigung der Verbindungsstangen so weit es ging außen am Pumpschwengel anzusetzen, um eine optimale Hebelwirkung zu erreichen. Die Verbindungsstangen verliefen folglich leicht schräg. Nun wäre die Oberkonstruktion zwar bereits funktionsfähig gewesen, doch da wir sie nicht in der Erde versenken konnten, lag der Angelpunkt des Pumpschwengels 230 cm über dem Boden - zu hoch, um für die Besucher des Parks benutzbar zu sein. Also wurden an den beiden Enden des Pumpschwengels Verlängerungen aus Kanthölzern angebracht, die, wieder mit Gewindehaken am Schwengel befestigt, an dessen Enden nach unten hingen, und so eine leichtere Bedienung ermöglichten. Zuletzt wurde ein 160 cm langes Kupferrohr (\varnothing 2,5 cm) als provisorische Steigleitung angebracht und am Pumpstock durch einen Lederstreifen abgedichtet (Abb. 6).



Abb. 6: Pumpenaufbau

Ergebnisse: Effektivität und Probleme

Nach Fertigstellung der Pumpe wurde sie zunächst in eine mit Wasser gefüllte Plastikwanne gestellt. Dabei stand der Pumpstock zu etwa einem Drittel unter Wasser (Abb. 7). Nach mehrmaligem Betätigen der Pumpe, sind folgende Beobachtungen gemacht worden:



Abb. 7: Erster Funktionstest der Pumpe

Grundlegend kann festgehalten werden, dass die Pumpe funktionsfähig und in der Lage war, Wasser durch die Steigleitung nach oben zu transportieren. Mit schnellem, kräftigem Pumpen war es möglich, einen konstanten Wasserfluss zu erzeugen. Wir können also in dieser Hinsicht unser Experiment als Erfolg verbuchen, da der Nachbau mit Hilfe der hypothetischen Außenkonstruktion die erwartete Leistung erbracht hat.

Im Rahmen des Projekts wurde auch die Effizienz der Pumpe getestet. Durch die Außenkonstruktion wurden die Kolben nicht weit genug in die Kolbengänge gedrückt, wodurch nicht genügend Druck aufgebaut werden konnte, um so Wasser durch die Steigleitung zu pumpen. Aus diesem Grund wurden die Kolben selbst manuell bewegt, damit die Leistung der Pumpe ermittelt werden konnte (Abb. 7).

Die Pumpe erzeugte einen relativ konstanten Wasserstrahl, wobei die Leistung, je nach Kraft und Anzahl der Kolbenbewegungen, variierte. Wurden die Kolben von einer Person betätigt, konnten zwischen 12 und 15 Liter pro Minute gefördert werden. Pumpen zwei Personen, von denen jede einen Kolben betätigte, konnten sogar 17-20 Liter Wasser pro Minute durch die Steigleitung gedrückt werden.

Anhand von mehreren Messungen wurde ermittelt, dass bei einer schnellen und kräftigen Kolbenbewegung ca. 200 ml Wasser aus der Öffnung der Steigleitung (Länge: 90 cm, \varnothing 2,5 cm) gedrückt werden.

Grundlegend kann festgehalten werden, dass die Pumpe funktionsfähig und in der Lage war, Wasser relativ konstant durch die Steigleitung nach oben zu transportieren. Wir können also in dieser Hinsicht unser Experiment als Erfolg verbuchen, da der Nachbau die erwartete Leistung erbrachte.

Um die Pumpleistung zu optimieren, können aber noch folgende Verbesserungen vorgenommen werden:

Es sollte darauf geachtet werden, dass bei der Bohrung der Kolbengänge eine glatte Röhre ohne Unebenheiten entsteht. Bei unserem Pumpstock wurde von zwei Seiten zur Mitte hin gebohrt, so dass eine leichte Abweichung entstand, durch welche die Kolben immer wieder leicht blockierten, was die Belastung auf Schwengel und Zugstangen erhöhte. Zudem sollten die Kolbengänge unbedingt in größerem Abstand voneinander, und eventuell leicht schräg (1,5 cm Abweichung von der Parallelen) gebohrt werden, um eine größere Hebelwirkung am Pumpschwengel zu erzeugen.⁴⁷

Damit man eine größere, mehr Wasser fassende Druckkammer ausstemmen kann, ist es von Vorteil, genau wie bei den gefundenen Pumpen, die Kolbengänge etwas weiter vorne am Pumpstock zu setzen. In diesem Experiment hat sich zudem das Leder der Ventile mehrfach beim Öffnen an der Rückwand der Druckkammer verklemmt, was ebenfalls durch eine größere Druckkammer verhindert werden kann.

Zur Abdichtung der Bodenplatte benutzten wir Birkenpech, das in geschmolzenem Zustand auf die Spalten aufgetragen wurde. Durch das Ausdehnen des Holzes unter Wasser brach aber stellenweise das Pech wieder auf. Wie auch schon bei der Druckkammer genutzt, wäre hier eine Abdichtung aus Leder effektiver. Diese hält dem Wasserdruck deutlich besser stand, da das Leder unter Wasser aufquillt und jegliche Öffnungen verschließt.

Auch bei der Außenkonstruktion können Verbesserungen durchgeführt werden:

Welche Auswirkungen hat eine effiziente Außenkonstruktion auf die Leistung der Pumpe und kann dadurch ein höheres Ergebnis erzielt werden? Bei unserem Experiment hatten wir die Verbindungsstücke zwischen Kolben und Pumpschwengel mit ineinander greifenden Gewindehaken befestigt. Da diese Art der Befestigung aber recht viel Bewe-

⁴⁷ Vgl. NEYSES 1972, 112.

gungsspielraum ließ und die Kraftübertragung vom Schwengel auf die Kolben verringerte, beeinträchtigte dies die Bedienung und Wirkung der Pumpe. Hier muss stattdessen zumindest zwischen Kolben und Verbindungsstück eine feste Verbindung bestehen. Dies kann zum Beispiel mit einer Schlitz- und Zapfenverbindung erreicht werden. Eine sehr sinnvolle Alternative wären lange Kolben, die bis zum Schwengel reichen.

Weitere Punkte, die uns während des Experiments ins Auge fielen, betreffen zum einen das Material: Da die Pumpe lange Zeit im Wasser überdauern muss, sollten alle im Wasser stehenden Holzteile wegen ihres hohen Gerbsäuregehaltes aus Eiche sein. Auch sollte der Pumpstock komplett unter Wasser stehen, damit keine Luft in den Pumpkreislauf kommt.⁴⁸ Zu guter Letzt sollte darauf geachtet werden, dass der künftige Pumpstock vor seiner Bearbeitung nicht zu lange in trockener Umgebung gelagert wird. In unserem Experiment wies der Pumpstock bereits Risse auf, was die Abdichtung erschwerte.

Fazit

Es kann zuallererst festgehalten werden, dass es uns geglückt ist, ein funktionierendes Modell einer römischen Doppelkolbendruckpumpe zu bauen. Dies bildete eine wichtige Grundlage unseres Experiments und ermöglichte es uns, die Pumpe auf ihre Funktionsweise hin zu überprüfen. Als hilfreiche und aussagekräftige Ergebnisse dieses Experiments können die Modifikationsvorschläge an der Pumpe selbst wie an der Außenkonstruktion genannt werden, durch welche die Funktion und Leistung der Pumpe erleichtert und verbessert werden kann.

Es konnten zwar nicht alle Fragen einwandfrei geklärt werden, es wurde jedoch eine solide Grundlage für weitere Experimente geschaffen. Man kann die oben genannten Punkte aufgreifen und die Verbesserungsvorschläge auf ihre Umsetzbarkeit prüfen. Auch können in zukünftigen Experimenten weitere, an erhaltenen Funden dokumentierte Bauweisen, die von dieser abweichen, ausprobiert, auf ihre Effektivität getestet, und mit unseren Ergebnissen verglichen werden, wie zum Beispiel mit Blei verkleidete Kolbengänge.⁴⁹ Zukünftig wird zudem die Haltbarkeit der Pumpe bei einer längerfristigen Nutzung untersucht und gemessen, welche Abnutzungserscheinungen auftreten, aussa-

⁴⁸ Vgl. CECH 2011, 107: „Druckkolbenpumpen müssen im zu hebenden Wasser stehen.“ und LEHMANN 1922, 27: „Die hölzernen Pumpen waren stets in der Nähe der Brunnensohle, im Wasser selbst, aufgestellt, denn die Holzteile konnten nur im Wasser die Dichtigkeit behalten“.

⁴⁹ Siehe z.B. LEHMANN 1922, 25.

gekräftigte Ergebnisse würde aber vor allem die Implementierung in einen echten, viel genutzten Brunnenschacht hervorbringen.

Inwiefern aber ist uns dieser Mechanismus heute noch von Nutzen? Bei genauerer Betrachtung wird uns klar, dass auch heute noch viele mechanische Geräte auf diesem einfachen Prinzip beruhen - es also keineswegs veraltet ist. Pumpen, die nach dem gleichen Prinzip arbeiten, sind immer noch im Einsatz. Unser Experiment stellt also ebenfalls einen einfachen Zugang zu einer altbewährten Technologie dar, die auch ohne moderne technische Hilfsmittel und mit leicht zugänglichen Materialien umgesetzt werden kann. Dies könnte zum Beispiel in Entwicklungsländern, in denen moderne Technologien schwer zugänglich sind, zum Einsatz kommen.

Quellenausgaben

LUCIUS IUNIUS MODERATUS COLUMELLA, Zwölf Bücher über Landwirtschaft I, hg. von W. Richter (Berlin 1981).

SEXTUS IULIUS FRONTINUS, Wasser für Rom. Die Wasserversorgung durch Aquädukte, erl. und übers. von M. Hainzmann (München/Zürich 1979).

HERON VON ALEXANDRIA, Druckwerke und Automatentheater, hg., erl. und übers. von W. Schmidt (Leipzig 1899).

CAIUS PLINIUS SECUNDUS D. Ä., Naturkunde, 37 Bde., hg. und übers. von R. König/G. Winkler (Zürich u. a. 1990-2004).

MARCUS VITRUVIUS POLLIO, Zehn Bücher über Architektur, hg., übers. und mit Anmerkungen versehen v. C. Fensterbusch (Darmstadt 1964).

Literatur

Albrecht 2014: N. ALBRECHT, Römerzeitliche Brunnen und Brunnenfunde im rechtsrheinischen Obergermanien und in Rätien (Diss. Mannheim 2014).

Cech 2011: B. CECH, Technik in der Antike (2. Aufl. Darmstadt 2011).

Cüppers 1992: H. CÜPPERS, Das römische Trier - Stadtentwicklung und Baugeschichte, öffentliche und private Badeanstalten, in: Frontinus-Gesellschaft (Hg.), Frontinus-Tagung 1991 in Trier und weitere Beiträge zur historischen Entwicklung der Wassertechnik. Frontinus-Schriftenreihe 16 (Bonn 1992) 19-44.

Koepfer 2014: CHR. KOEPFER, Ein Experiment zum Bau einer hölzernen römischen Doppelkolbendruckpumpe, in: J. Blei / Chr. Koepfer (Hg.), Römische Technik im Experiment. Studentische Projekte zur Experimentellen Archäologie im Europäischen Kulturpark Bliesbruck-Reinheim (2014) 87-106, via: <https://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/2647>

Krafft 1999: F. KRAFFT, s. v. Ktesibios. DNP 6 (Stuttgart 1999) 876.

- Lehmann 1922: H. LEHMANN, Eine römische Saug- und Druckpumpe aus Trier, in: Trierische Heimatblätter 1 (1922) 24-27.
- Neyses 1975: A. NEYSES, Römische Doppelkolben-Druckpumpe aus Eichholz aus Wederath/Hunsrück, in: Kölner Römer-Illustrierte 2 (1975) 308 f.
- Neyses 1972: A. NEYSES, Eine römische Doppelkolbendruckpumpe aus dem Vicus Belginum, in: Trierer Zeitschrift 35 (1972) 109-121.
- Richter 2005: P. RICHTER, Experimentelle Archäologie: Ziele, Methoden, Aussagemöglichkeiten, in: ExAr (Hg.), Von der Altsteinzeit über ‚Ötzi‘ bis zum Mittelalter. Ausgewählte Beiträge zur Experimentellen Archäologie in Europa 1990-2003. Experimentelle Archäologie in Europa Sonderband 1 (Oldenburg 2005) 95-128.
- Stein 2007a: R.J.B. STEIN, Roman Wooden Force Pumps, PH.D. Thesis, University of Reading (2007), via ETHOS:
<http://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.444026>
- Stein 2007b: R.J.B. STEIN, Roman Wooden Force Pumps. Use and Performance, in: J.-P. Brun/J.-L. Fiches (Hg.), Énergie hydraulique et machines élévatrices d’eau durant l’Antiquité (Neapel 2007) 7-17.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: A. NEYSES, Eine römische Doppelkolbendruckpumpe aus dem Vicus Belginum, in: Trierer Zeitschrift 35 (1972) 110 und 113.
- Abb. 2-7: Eigene Bilder.

Tabellen und Anlagen

Anlage 1:

Deichel-Holzbohrer-Messungen am 12.07., 25./26.07. und 01.08.2015:

Tabellarische Aufzeichnungen zur Bohrtiefe

ABKÜRZUNG AKTEURE:

JA	Julia Ahlert
AB	Alina Bell
JB	Josephine Blei
CE	Christoph Eßer
AG	Alexander Göller
TH	Tobias Häring
CK	Christian Koepfer
MM	Mia-Alena Maas
JM	Johannes Mair
AM	Agnes Mayer
BS	Beatrice Spengler
LS	Lisa Stanislawski

12.07.: Deichel 1 mit kleinem Bohrer

Runde	Name	1/2 Dreh	Richtung	Tiefe
1	JM	50	Rechts	2
2	JM	50	Rechts	3
3	JM	50	Rechts	5,5
4	JM	50	Rechts	6,5
5	JB	50	Rechts	7
6	JB	50	Rechts	7,5
7	JB	50	Rechts	8,2
8	JB	50	Rechts	9,5
9	JA	50	Rechts	10,6
10	JA	50	Rechts	11
11	JA	50	Rechts	11*
12	JA	50	Rechts	11,7
13	CK	50	Rechts	13
14	CK	50	Rechts	14

Runde	Name	1/2 Dreh	Richtung	Tiefe
15	CK	50	Rechts	15,2
16	CK	50	Rechts	15,3
17	AM	100	Rechts	15,2*
18	AM	100	Rechts	16
19	JM	100	Rechts	18,3
20	JM	100	Rechts	19,6
21	JB	100	Rechts	20
22	JB	100	Rechts	20,7
23	Gast	100	Rechts	23,4
24	JA	100	Rechts	22,4*
25	JM	100	Rechts	25,6
26	JM	200	Rechts	25,9
27	JB	100	Rechts	25,9
28	JB	100	Links	27,2
29	JA	100	Links	27,8
30	JA	100	Links	28,5
31	JM	100	Rechts	31,3
32	JM	100	Rechts	33,1
33	JB	100	Links	33,4
34	JB	100	rechts	35,2
35	JA	100	Rechts	36
36	JA	100	Links	37,1
37	CK	100	Links	39,2
38	CK	100	Links	40
39	JB	100	Rechts	41,5
40	JB	100	Rechts	41,2*
41	AM	100	Rechts	43
42	CK	100	Rechts	44

* zu 11, 17, 24, 40: Die Stagnation oder sogar Abnahme der Bohrtiefe erklärt sich dadurch, dass der Stamm nicht gründlich genug vom Bohrabfall befreit worden war.

25.07.: Fortsetzung Deichel 1 mit kleinem Bohrer

Runde	Name	1/2 Dreh	Richtung	Tiefe
43	JB	100	Rechts	46,2
44	BS	100	Rechts	48
45	LS	100	Rechts	48,9
46	JB	100	Rechts	50,1
47	AG	100	Rechts	54,2
48	AB	100	Rechts	55,6
49	JB	100	Rechts	57,5
50	LS	100	Rechts	60,3
51	AB	100	Rechts	62,2
52	JB	100	Links	62,8
53	BS	100	Rechts	67,2
54	LS	100	Rechts	69,8
55	AG	100	Rechts	74,5
56	TH	100	Rechts	77,3
57	JB	100	Rechts	78,5
58	BS	100	Rechts	81
59	Gast	100	Rechts	82,5
60	Gast	100	Rechts	82,7
61	BS	100	Rechts	88,3
62	JB	100	Rechts	88,6
63	CE	100	Rechts	90,5
64	LS	100	Rechts	90,8
65	AB	100	Rechts	92,4
66	BS	100	Rechts	96,8
67	JB	100	Rechts	96,4
68	Gäste*	200	Rechts	97
69	AG	100	Rechts	103,1
70	AB	100	Rechts	103
71	LS	100	Rechts	103,5
72	JB	100	Rechts	105,2
73	LS	100	Rechts	104,7

Runde	Name	1/2 Dreh	Richtung	Tiefe
74	CK	100	Rechts	109
75	AG	100	Rechts	110,3

* zu 68: Da sich eine Gruppe von Schülern kaum bremsen ließ, liegen hier doppelt so viele Umdrehungen vor.

26.07.: Stamm umgedreht: Deichel 1 von anderer Seite mit kleinem Bohrer

Runde	Name	1/2 Dreh	Richtung	Tiefe
1	CK	100	Links	0*
2	LS	100	Rechts	1,7
3	CE	100	Links	3,5
4	AG	100	Rechts	6,2
5	JB	100	Rechts	8,2
6	TH	100	Links	10,3
7	AB	100	Rechts	13
8	BS	100	Rechts	16
9	LS	100	Rechts	17,7
10	CE	100	Rechts	20,7
11	AG	100	Rechts	23,5
12	CK	100	Links	26
13	JB	100	Rechts	28,4
14	CE	100	Rechts	32
15	BS	100	Rechts	34,7
16	AB	100	Rechts	36,8
17	JB	100	Rechts	38,7
18	AG	100	Rechts	41
19	LS	100	Rechts	42
20	TH	50	Rechts	**

* zu 1: 3,5 cm (= Bohrspitze, wurde nicht gemessen)

** zu 20: Keine genaue Messung möglich, da der Bohrer beim Durchbruch durchgerutscht ist.

26.07.: Deichel 1 mit mittlerem Bohrer

Bei allen Messungen wurde, anders als zuvor, von der Spitze des Bohrers aus gemessen. Die Umdrehungen wurden wegen des nun größeren „Aushubs“ auf 25 (=50 halbe Drehungen) reduziert.

Runde	Name	1/2 Dreh	Richtung	Tiefe
1	CK	50	Rechts	10,2 (inkl. Löffel)
2	CK	50	Rechts	15,6
3	LS	50	Rechts	18,5
4	JB	50	Rechts	22,2
5	AG	50	Rechts	26
6	TH	50	Rechts	29,5
7	LS	50	Rechts	29,8
8	CK	50	Rechts	33,6
9	AG	50	Rechts	36,4
10	AB	50	Rechts	37,6
11	BS	50	Rechts	40,1
12	TH	50	Rechts	42,1
13	TH	50	Rechts	46,8
14	JB	50	Rechts	46,8
15	AB	50	Rechts	50,4
16	AG	50	Rechts	57
17	AB	50	Rechts	57,8

26.07.: Stamm umgedreht: Deichel 1 von anderer Seite mit mittlerem Bohrer

Runde	Name	1/2 Dreh	Richtung	Tiefe
1	CK	25	Rechts	18,5
2	TH	50	Rechts	23,8
3	BS	50	Rechts	31
4	LS	50	Rechts	35,5
5	AG	50	Rechts	41,3
6	JB	50	Rechts	46,3
7	CK	50	Rechts	52
8	TH	50	Rechts	59,1
9	AG	50	Rechts	64,8
10	LS	50	Rechts	68,4

Runde	Name	1/2 Dreh	Richtung	Tiefe
11	BS	50	Rechts	75,6
12	AB	50	Rechts	80
13	BS	50	Rechts	83,4
14	TH	50	Rechts	89,9
15	CK	50	Rechts	92,4
16	BS	50	Rechts	113,7*

* zu 16: Hier ist der Bohrer in den Tunnel von der anderen Seite gerutscht, so dass nur eine ungefähre Messung möglich war.

01.08.2015: Deichel 1 mit großem Bohrer

Runde	Name	1/2 Dreh	Richtung	Tiefe
1	AG	„Anbohren“	Rechts	12,4
2	AG	25	Rechts	21,4
3	CK	25	Rechts	33,9
4	CK	50*	Rechts	46,5
5	AG	25	Rechts	54,8
6	MM	25	Rechts	60,6
7	BS	25	Rechts	67
8	TH	25	Rechts	68,8
9	CK	25	Rechts	75
10	TH	25	Rechts	85
11	AG	25	Rechts	91,3
12	CK	25	Rechts	95,5
13	TH	25	Rechts	96,2
14	JB	25	Rechts	101,5
15	TH	25	Rechts	108,2
16	CK	25	Rechts	111,4
17	CE	25	Rechts	118,3
18	CK	25	Rechts	128,7
19	CK	25	Rechts	137,3
20	AG	70	Rechts	150

* zu 4: 50 Umdrehungen waren nicht praktikabel, da zuviel Abraum im Stamm bleibt; deshalb wurde wieder auf 25 Umdrehungen umgestellt.

Anlage 2:**Liste des zum Pumpenbau verwendeten Materials**Pumpe:

- ✦ Zugesägter Eichenholzblock für den Pumpstock von Hubert Forstner (20x30x50 cm)
- ✦ Eichenholz für Kolben vom Forstamt Diedorf (Kolben ca. 60 cm lang, ca. Ø 7,5 cm, also 2-3 mm schmaler als Kolbengänge)
- ✦ Kiefern Bretter für Unterseite und zum Verschluss der Ventilkammer
- ✦ vegetabil gegerbtes Ziegenleder und vegetabil gegerbtes Rindsleder (zum Verdichten der Ventilkammer, des Bodens und der Kolben und als Ventilkappen)
- ✦ 10 Nägel
- ✦ 12 Holzpfeifen (Ø 2,5 cm, 3 cm lang)
- ✦ 12 Holzbohrer (Ø 1 cm, 4 cm lang)
- ✦ Blei (zum Beschweren der Ventilkappen und zum Fixieren des Leders an den Kolbenenden, 2 Gewichte für Kolben, 2 Gewichte für Lederkappen unten, 2 Gewichte für Lederkappen der Ventilkammer)
- ✦ Birkenpech als alternatives Dichtmittel
- ✦ Kupferrohr (Ø 2,5 cm) als Steigleitung

Außenkonstruktion:

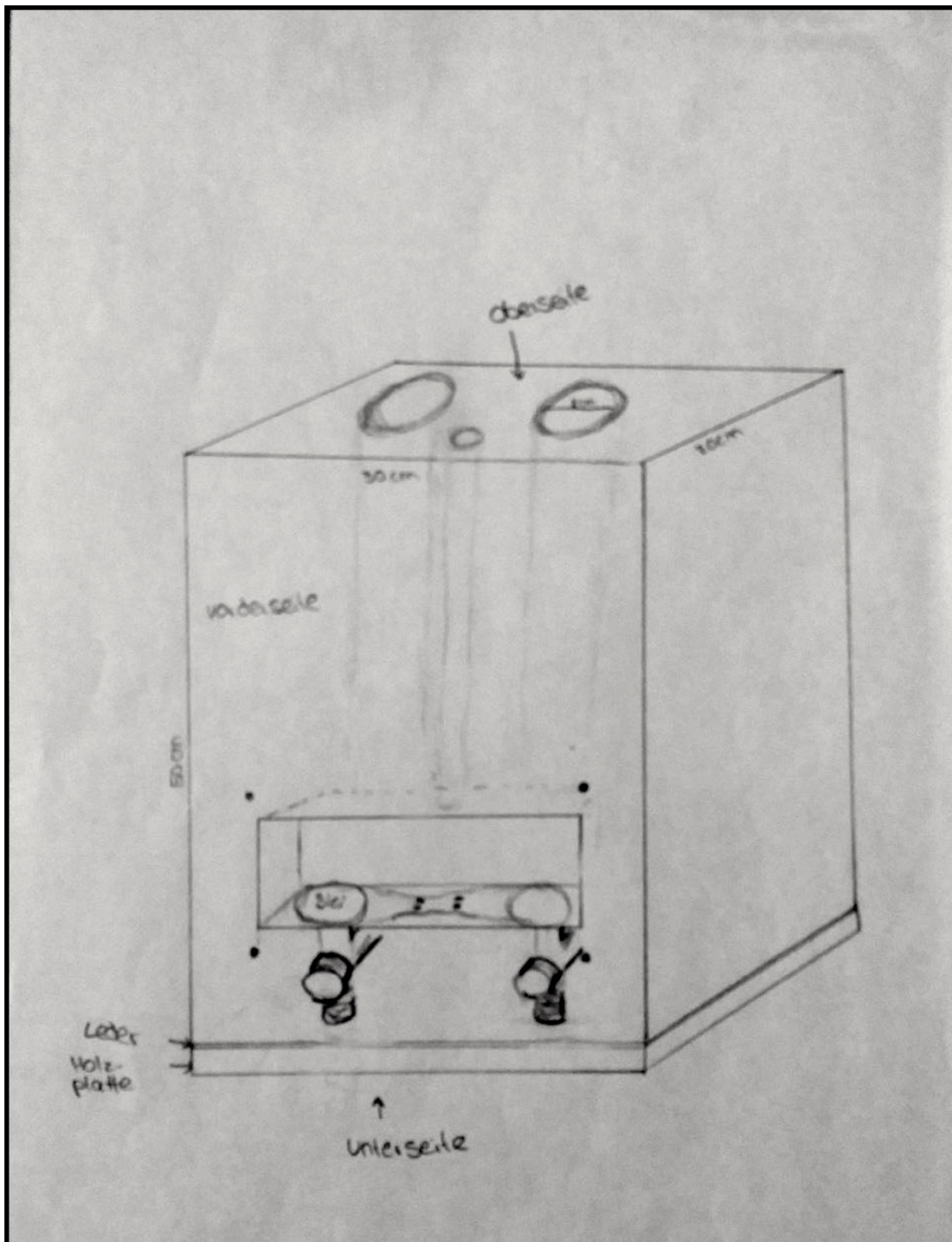
- ✦ 4 Kanthölzer 230 cm für das Gerüst
- ✦ 2 Kanthölzer 73 cm für die Querstreben
- ✦ Kantholz 200 cm für den Pumpschwengel
- ✦ Rundholz 30 cm (Ø 5cm) als Achse für den Pumpenschwengel
- ✦ 2 Kanthölzer ca. 130 cm für die Verbindungen Schwengel-Kolben
- ✦ 8 Stahlwinkel
- ✦ 12 Gewindehaken
- ✦ Nägel (2“) und Schrauben

Werkzeuge:

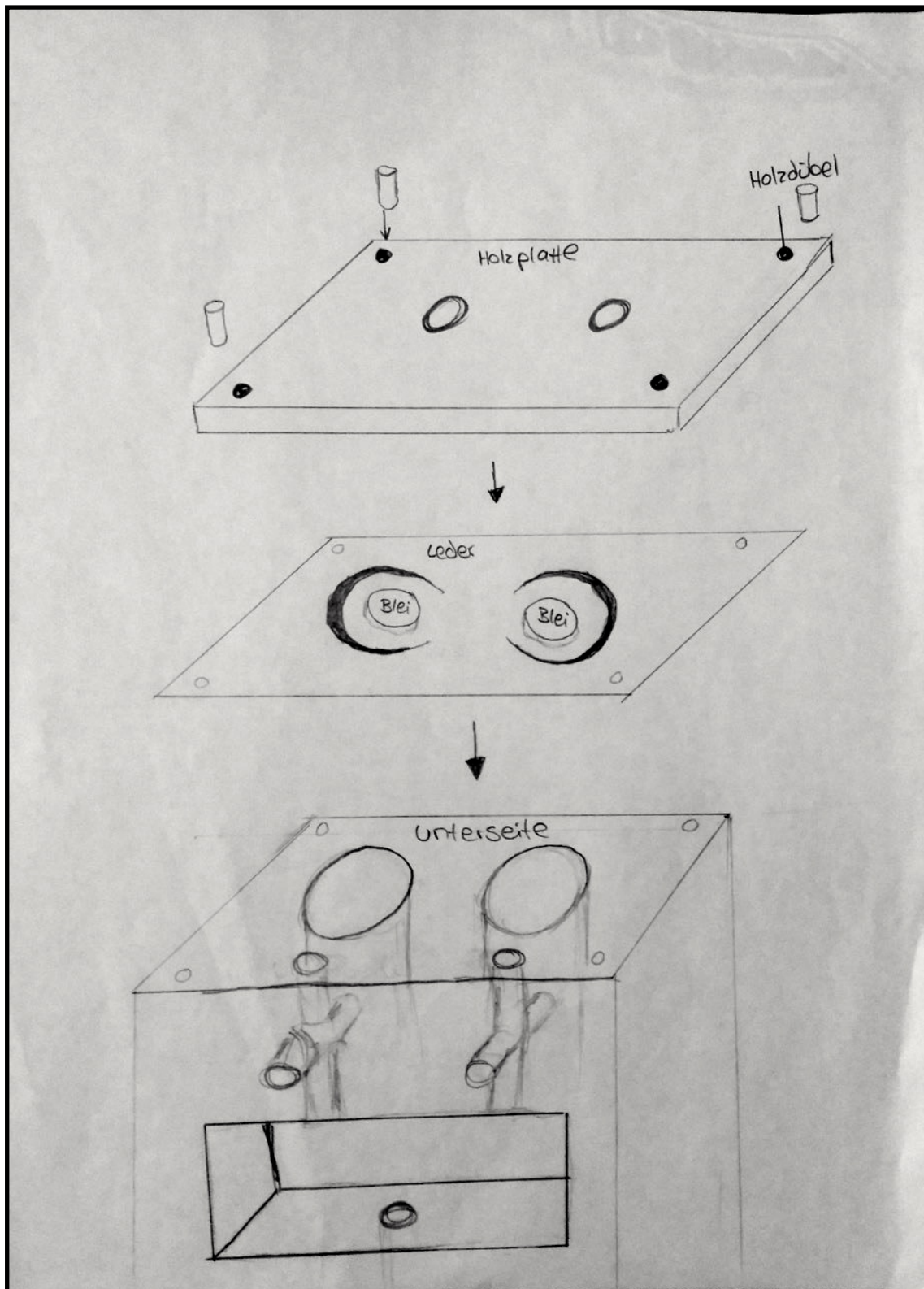
- ✦ Kettensäge
- ✦ Zieheisen
- ✦ Raspeln
- ✦ Schleifpapier
- ✦ Bohrmaschine
- ✦ Holzbohrer (Ø 2,4 cm)
- ✦ Holzhammer, Hammer 300g
- ✦ Lederschere
- ✦ Säge
- ✦ Stemmeisen

Anlage 3:**Bau des Pumpstocks: Arbeitsschritte**

Arbeitsschritte	Material, Werkzeug	Akteure
Eichenblock zusägen	Kettensäge, Eichenblock	Hubert Forstner Beatrice Spengler
Kolbengänge bohren	Senker mit Führungsdorn	Helmut Schmid, Firma Pletschacher
Kolbengänge raspeln und schleifen	Raspeln, Schleifpapier	Alina Bell Beatrice Spengler
Ventilkammer ausstemmen und schleifen	Stemmeisen, Hammer, Schleifpapier	Alina Bell Alexander Göller Beatrice Spengler
Steigleitung sowie Verbindung zwischen den Kolbengängen und der Ventilkammer bohren (vier Bohrungen: zwei Bohrungen von der Vorderseite zu den Kolbengängen, zwei von der Unterseite zur Ventilkammer) und diese mit Pfropfen verstöpseln	Bohrmaschine, Holzbohrer, Hammer 4 Pfropfen	Christian Koepfer Beatrice Spengler
Vier Bleigewichte gießen für Lederklappen	Gießsand, Blei	Christian Koepfer
Leder für Klappen der Ventilkammer zuschneiden, Bleigewichte daran befestigen und vernieten, Lederklappen in der Ventilkammer festnageln	Lederschere, Hammer Leder, Bleigewichte, Nägel	Alexander Göller Beatrice Spengler
Brett zum Verschließen der Ventilkammer zusägen, zur Abdichtung Leder verwenden, Löcher für Holzdübel bohren, mit Holzdübeln das Brett (Leder dazwischen) befestigen	Säge, Bohrer, Lederschere, Hammer Leder, 4 Holzdübel	Alina Bell, Alexander Göller Beatrice Spengler
Leder zur Abdichtung der Unterseite zuschneiden, Ventilkappen zuschneiden, Bleigewichte vernieten	Lederschere Leder, Bleigewichte	Beatrice Spengler
Brett für Pumpenunterseite zusägen, Ansauglöcher (Ø 2,5 cm) hineinbohren, Löcher für Holzdübel bohren, Brett mit Leder auf Unterseite von Pumpstock befestigen	Säge, Bohrer, Hammer 8 Holzdübel	Christoph Eßer Beatrice Spengler
Abdichtung mit Birkenpech	Birkenpech	Alina Bell Alexander Göller

Anlage 4:**Skizzen zum Bau des Pumpstocks**

Taf. 1: Vorderansicht des Pumpstocks mit offener Druckkammer (eigene Skizze)



Taf. 2: Unterseite des Pumpstocks mit Befestigung der Ventile am Fuß der Kolbengänge (eigene Skizze)

